

Janaína Januário Philippi

**ESTUDO DE METODOLOGIA PARA MODELAGEM
ELETROMAGNÉTICA SIMPLIFICADA DE MATERIAL
COMPÓSITO DE FIBRA DE CARBONO CONTÍNUA
REFORÇADA**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Departamento de
Engenharia Elétrica e Eletrônica da
Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Dr. Walter Pereira
Carpes Junior

Florianópolis
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Januário Philippi, Janaína
Estudo de Metodologia para Modelagem
Eletromagnética Simplificada de Material Compósito
de Fibra de Carbono Contínua Reforçada / Janaína
Januário Philippi ; orientador, Walter Pereira
Carpes Junior, 2019.
77 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica,
Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

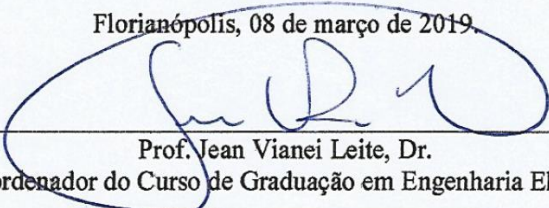
1. Engenharia Elétrica. 2. Efetividade de
Blindagem. 3. Compatibilidade Eletromagnética. 4.
Material Compósito. 5. Fibra de Carbono. I. Pereira
Carpes Junior, Walter . II. Universidade Federal de
Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica.
III. Título.

Janaína Januário Philippi

**ESTUDO DE METODOLOGIA PARA MODELAGEM
ELETROMAGNÉTICA SIMPLIFICADA DE MATERIAL
COMPÓSITO DE FIBRA DE CARBONO CONTÍNUA
REFORÇADA**

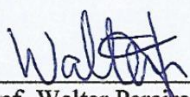
Este Trabalho foi julgado adequado como parte dos requisitos para
obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado, em
sua forma final, pela Banca Examinadora

Florianópolis, 08 de março de 2019.

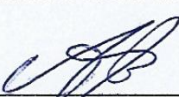


Prof. Jean Viane Leite, Dr.
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

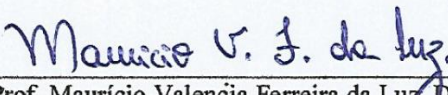
Banca Examinadora:



Prof. Walter Pereira Carpes Junior, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. João Pedro Assumpção Bastos, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Maurício Valência Ferreira da Luz, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais, Paulo e Raquel, por terem sempre me incentivado a alcançar o meu melhor.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, gostaria de agradecer aos meus pais, que são a minha base de vida. À minha mãe, Raquel, por ter sido sempre o meu porto seguro, por ter me amado acima de tudo e por ter me apoiado e guiado em todas as decisões da minha vida. Ao meu pai, Paulo, por ter sido a minha fonte de inspiração para engenharia. Por ter me mostrado que se dedicar aos estudos é sempre o melhor caminho e me incentivado sempre a ser independente e esforçada, buscando alcançar sempre a minha melhor versão. Agradeço à minha irmã, Joanna, por ter me visto sempre como um exemplo de irmã mais velha. Ela me incentivou a nunca perder o foco e sempre estava lá para me dar um abraço de caçula quando os problemas apertavam.

Agradeço ao Caio, meu marido, por ter sido a pessoa que mais me ajudou e me inspirou esse ano. Por ter me amado, me dado carinho e pegado na minha mão e me ajudado a seguir em frente, mesmo nos momentos em que eu não queria mais. Agradeço por ele ter sido a luz no fim do túnel em muitos momentos desde que entrou em minha vida.

Agradeço ao meu querido amigo Heitor, que se tornou meu companheiro de curso desde o primeiro semestre, que me ensinou e me ajudou quando eu tive dificuldades, e por ter incentivado uma competição saudável entre nós dois, que me manteve ativa e motivada para enfrentar a graduação.

Agradeço ao Professor Walter, por ter aceitado ser meu orientador e ter me apoiado durante boa parte desse ano na confecção desse trabalho de conclusão de curso e por ter me dado vários “nortes” quando eu estava perdida na confecção do TCC.

Somos apenas poeira de estrelas trazida à vida,
depois dotada pelo universo do poder de se
compreender – e nós apenas começamos.

(Neil deGrasse Tyson, 2017)

RESUMO

Este trabalho realiza o estudo de uma metodologia de modelagem eletromagnética simplificada para materiais compósitos de fibra de carbono contínua e reforçada. A teoria eletromagnética de base é apresentada e o modelo teórico é explicado e fundamentado. As camadas dos compósitos e as direções angulares das fibras são levadas em consideração para alcançar os resultados. Simulações computacionais são realizadas para a obtenção de curvas de coeficiente de reflexão e seus resultados são apresentados através de gráficos. As análises destes gráficos são realizadas, nas quais são discutidas quais combinações para os compósitos, retiradas do modelo de simplificação proposto, são as mais adequadas para o propósito de análise do trabalho. O objetivo de preservar as características fundamentais da anisotropia dos materiais compósitos de fibra de carbono contínua e reforçada é alcançado na modelagem proposta pelo trabalho.

Palavras-chave: Efetividade de blindagem. Materiais compósitos. Fibras de carbono.

ABSTRACT

This paper introduces a simplified electromagnetic modeling methodology for reinforced continuous carbon fiber. The basis of electromagnetic theory is shown and the theoretical model is supported and explained. The composite layers and the angular directions of carbon fibers are considered to achieve the results. Computational simulations are performed to obtain the reflection coefficient curves and the results are present by graphs. The analyses of these plots are performed and the combinations of the composites are the most suitable for the purpose of the paper, always following the simplification model presented. The goal of preserving the anisotropic key features of the composite materials is achieved by the proposed modeling.

Keywords: Shielding effectiveness. Composite materials. Carbon fiber.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Transmissão e reflexão de onda eletromagnética.....	35
Figura 2 – Absorção de onda eletromagnética.	36
Figura 3 – Blindagem eletromagnética por efeito de reflexão....	38
Figura 4 - Esquemático de compósito RCCF visão frontal (a) e lateral (b).	41
Figura 5 – Esquemático explicativo do modelo 3-layer homogêneo.....	42
Figura 6 – Volume relativo ocupado pela fibra “g” para o modelo 3-layer homogêneo.....	43
Figura 7- Coordenadas globais xyz e coordenadas principais uvw	45
Figura 8 – Esquemático para modelo de compósito de três camadas.....	49
Figura 9 – Magnitude do coeficiente de reflexão.	52
Figura 10 - Magnitude do coeficiente de reflexão obtido no CST Studio.	53
Figura 11- Magnitude do coeficiente de reflexão.....	54
Figura 12- Magnitude do coeficiente de reflexão obtido no CST Studio.	55
Figura 13 - Modelo esquemático de material compósito de camada única utilizando a aproximação homogênea de 3-layers.....	56
Figura 14 – Gráfico comparativo dos coeficientes de reflexão de material compósito de camada única com E polarizado em x.	57
Figura 15 - Gráfico comparativo dos coeficientes de reflexão de material compósito de camada única com E polarizado em y.	57
Figura 16 - Modelo esquemático de material compósito de camada dupla utilizando a aproximação homogênea de 3-layers.	58
Figura 17 - Gráfico comparativo dos coeficientes de reflexão de material compósito de camada dupla com E polarizado em x.	59
Figura 18 - Gráfico comparativo dos coeficientes de reflexão de material compósito de camada dupla com E polarizado em y.	60
Figura 19 - Gráfico comparativo dos coeficientes de reflexão de material compósito de quatro camadas com E polarizado em x.	61
Figura 20 – Modelo esquemático de material compósito de quatro camadas utilizando a aproximação homogênea de 3-layers.....	61
Figura 21- Gráfico comparativo das magnitudes do coeficiente de reflexão de material compósito de duas (0°/90°), quatro (0°/90°/0°/90°) e de seis (0°/90°/0°/90°/0°/90°) camadas com E polarizado em x.....	62
Figura 22 - Detalhe da Figura 21.....	62

Figura 23 - Gráfico comparativo das magnitudes do coeficiente de reflexão de material compósito de quatro camadas com fibras dispostas em $0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ$, $0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ$ e $90^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ$, sendo E polarizado em x.....	63
Figura 24 - Detalhe da Figura 23.....	64
Figura 25 - Tecido RCCF.....	64
Figura 26 - Modelo adaptativo de 3-layer homogêneo para tecido RCCF.....	65
Figura 27 – Comparação entre um compósito $0^\circ/90^\circ$ e outro $0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ$ com um compósito de tecido único e outro de tecido duplo, respectivamente, com E polarizado em x.	66
Figura 28 - Modelo esquemático de material compósito de duas camadas de tecido RCCF utilizando o modelo homogêneo de 3-layers adaptado.	67
Figura 29 - Gráfico comparativo entre compósitos de duas camadas com tecidos RCCF.	67
Figura 30 - Detalhe da Figura 29.....	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CFC – Compósito de Fibra de Carbono

RCCF – *Reinforced Continuous Carbon Fiber*

SE – *Shielding Effectiveness*

ACM – *Advanced Composite Material*

SCF – *Short Carbon Fiber*

CNT – *Carbon Nanotube*

CB – *Carbon Black*

HIRF – *High Intensity Radiated Field*

EMC – *Electromagnetic Compatibility*

EMI – *Electromagnetic Interference*

TEM – Transverso Eletromagnético

VSWR – *Voltage Standing Wave Ratio*

ARP5583 – *Address Resolution Protocol 5583*

LISTA DE SÍMBOLOS

μ	Permeabilidade Magnética [H/m]
ε	Permissividade Elétrica [F/m]
σ	Condutividade Elétrica [S/m]
α	Constante de Atenuação [Np/m]
β	Constante de Fase [rad/m]
γ	Constante de Propagação da Onda
λ	Comprimento de Onda [m]
η	Impedância Intrínseca do Meio [Ω]
Γ	Coeficiente de Reflexão da Onda
τ	Coeficiente de Transmissão da Onda
E	Vetor Campo Elétrico [V/m]
D	Vetor de indução elétrica [C/m ²]
H	Vetor campo magnético [A/m]
B	Vetor de indução magnética [T]
J	Vetor densidade superficial de corrente [A/m ²]
ρ	Densidade volumétrica de carga [C/m ³]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	MOTIVAÇÃO	28
1.2	OBJETIVO.....	29
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	29
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	31
2.1	MATERIAIS COMPÓSITOS.....	31
2.2	EQUAÇÕES DE MAXWELL.....	33
2.3	PROPAGAÇÃO E BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA.....	33
2.3.1	Reflexão e Transmissão	35
2.3.2	Absorção	36
2.3.3	Blindagem Eletromagnética	37
2.3.3.1	Blindagem por Absorção (<i>SEa</i>)	38
2.3.3.2	Blindagem por Reflexão (<i>SEr</i>).....	38
2.4	TRABALHOS ANTERIORES	40
3	DESENVOLVIMENTO	41
3.1	OS MODELOS DE EQUIVALÊNCIA DE HOLLOWAY ..	41
3.2	PROPAGAÇÃO EM MEIO ANISOTRÓPICO	45
3.3	MODOS ORDINÁRIO E EXTRAORDINÁRIO	49
4	RESULTADOS.....	51
4.1	VALIDAÇÃO DO MODELO	51
4.2	CAMADAS ÚNICAS.....	55
4.3	CAMADAS DUPLAS	58
4.4	QUATRO CAMADAS	59
4.5	COMPÓSITOS COM FIBRAS EM 0° e 90°	61
4.6	TECIDO DE RCCF	63
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
5.1	CONCLUSÕES	69
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	70
	REFERÊNCIAS.....	71

APÊNDICE A.....	75
------------------------	-----------

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço exponencial das ciências, engenharias e tecnologias, nos últimos anos vem-se percebendo uma significativa mudança nas tecnologias empregadas na indústria aeroespacial. Entre essas inovações está a implantação de materiais compósitos, como substituto de materiais metálicos, na confecção estrutural das aeronaves. Essa substituição vem sendo empregada em larga escala, já que materiais compósitos vêm se mostrando química e mecanicamente mais resistentes, além de mais leves que as placas de metal utilizadas anteriormente.

Entretanto, o emprego de recursos computacionais e eletrônicos em aeronaves aumentou drasticamente, fazendo com que elas possam ser consideradas máquinas computadorizadas que voam. No princípio, os comandos de uma aeronave eram mecânicos. Com a evolução da eletrônica, esses sistemas mecânicos foram substituídos por sistemas eletrônicos (*fly by wire*), tornando assim todo o controle e comando da aeronave, majoritariamente eletrônicos. Porém, sistemas eletroeletrônicos correm o risco de sofrerem interferências eletromagnéticas (EMI) que podem vir a prejudicar o seu correto funcionamento, fazendo com que seja de vital importância o controle eficiente da compatibilidade eletromagnética (EMC) que envolve todos os sistemas do avião.

Percebe-se, então, que a blindagem eletromagnética de uma aeronave é de extrema relevância, já que ela será responsável por bloquear grande parte da interferência eletromagnética externa à aeronave. Porém, ao se trocar metal por material compósito, notou-se uma queda brusca na blindagem que era fornecida pela fuselagem da aeronave, já que há uma relação direta entre condutividade elétrica e blindagem, e os materiais compósitos apresentam em média uma condutividade 1000 vezes menor do que os metais [5].

Sendo assim, é de crucial importância a análise da compatibilidade eletromagnética de todos os sistemas da aeronave. Nessa análise requerida, é necessário avaliar a efetividade de blindagem (*Shielding Effectiveness*) da fuselagem da aeronave. Essa verificação pode ser feita após a prototipagem da aeronave através de um ensaio de HIRF (*High Intensity Radiated Field*). Porém, esperar até a construção de um protótipo físico para analisar os possíveis (e prováveis) problemas de compatibilidade eletromagnética do projeto pode ter um custo muito elevado (tanto em relação a orçamento quanto a cronograma). Sendo assim, é fortemente indicada a utilização de

simulações eletromagnéticas no modelo digital do projeto da aeronave para uma análise rápida e barata dos possíveis problemas do projeto.

Contudo, a modelagem do material compósito utilizado na fuselagem do avião, não é trivial. O desafio acontece já que o material compósito de fibra de carbono contínua e reforçada (RCCF), um dos principais compósitos utilizados na indústria aeronáutica, é um material anisotrópico, ou seja, suas características eletromagnéticas mudam de acordo com a sua posição no espaço. Dessa forma, há, em teoria, a possibilidade de detalhar todas as singularidades desse material compósito de fibra de carbono (CFC), porém haverá um custo computacional elevadíssimo, que em larga escala (aeronaves são objetos muito maiores do que o diâmetro de uma fibra de carbono) é impraticável.

A opção factível é a simplificação na modelagem desse material. Porém, simplificar leva a erros de aproximação. Sendo assim, é necessário utilizar um método de simplificação na modelagem do material compósito que torne o objeto estudado o mais simples possível, porém que guarde suas informações as mais fidedignas possíveis. E é levando em conta esse *trade off* que o trabalho a seguir propõe uma metodologia para simplificação de material compósito de fibra de carbono, na análise de efetividade de blindagem, na faixa de frequência de 0 a 18 GHz.

1.1 MOTIVAÇÃO

Trabalhando no ramo da indústria aeronáutica, é possível perceber que há um alto nível de maturidade referente à utilização de softwares de simulação como base para as primeiras etapas do projeto de uma aeronave. Entretanto, enquanto os programas simuladores de fenômenos mecânicos, químicos e dinâmicos da aeronave estão bem creditados, consolidados e validados, percebe-se uma relutância, por parte da indústria aeronáutica, em utilizar programas simuladores de fenômenos eletromagnéticos. Normalmente problemas relacionados à conformidade (*compliance*) de compatibilidade e interferência eletromagnética só são efetivamente diagnosticados, avaliados e resolvidos após a construção e a realização de testes em protótipos.

O processo para se construir um protótipo, sendo ele em tamanho real ou não, é custoso tanto financeira quanto temporalmente para a empresa. O momento ideal para a construção de um protótipo físico e em real escala é após a vasta análise e validação do modelo criado através de simuladores digitais. Utilizando-se dessas ferramentas, para a

análise de todos os fenômenos envolventes na construção de uma aeronave é possível antecipar possíveis e prováveis problemas que o projeto apresentará. Problemas envolvendo *compliance* eletromagnética (regidas pela norma ARP5583) não são triviais, portanto nem sempre são intuitivas. Percebe-se, então, que é essencial a utilização de simuladores eletromagnéticos para detectar esses problemas antes da construção do protótipo, sendo possível fazer as devidas alterações logo no início do projeto, evitando-se assim futuras correções que serão mais custosas ao serem aplicadas no final do processo de criação e/ou produção.

O trabalho apresentado aqui tem como objetivo descrever uma metodologia para modelagem simplificada de material compósito, o qual está sendo utilizado em larga escala pela indústria aeronáutica. Pretende-se ajudar na validação e acreditação dos resultados de simulação eletromagnética, de forma que eles possam ser utilizados sem receios pela indústria aeronáutica.

1.2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia de simplificação, para modelagem eletromagnética de material compósito, composto por multicamadas sobrepostas de fibras de carbono contínuas reforçadas (RCCF), posicionadas em ângulos diferentes em relação ao eixo cartesiano global (ou em relação à orientação da polarização da onda eletromagnética incidente). O objetivo final é a avaliação da efetividade de blindagem do material compósito modelado.

Esta monografia apresentará resultados de magnitude do coeficiente de reflexão de amostras hipotéticas de material compósito RCCF com camadas únicas, duplas e compostas por quatro camadas. Será apresentado o conceito de tecido RCCF, além da análise sobre as contribuições dos ângulos 0° e 90° e suas combinações.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido em cinco capítulos: introdução, revisão bibliográfica, desenvolvimento, resultados e conclusão. Na introdução, há uma breve explicação sobre o tema a ser estudado, sobre a motivação que levou a aluna a escolher esse tema, o objetivo do trabalho e como ele se encontra dividido.

Na revisão bibliográfica, é possível encontrar mais informações sobre materiais compósitos; as equações de Maxwell que regem o

eletromagnetismo e, portanto este trabalho; e uma leve revisão sobre propagação de ondas e blindagem, que constituem o núcleo teórico desta monografia. Apresenta-se também um histórico, avaliação e breve estudo sobre os softwares de simulação eletromagnética, disponíveis e mais conhecidos. Por último, fala-se sobre os trabalhos anteriores já realizados nessa área.

Em desenvolvimento, encontra-se a explicação da teoria empregada nesta monografia e o desenvolvimento analítico utilizado para resolução do problema que é proposto pelo objetivo do trabalho. Em resultados, são apresentados gráficos que demonstram as simulações realizadas assim como as análises desses gráficos. E, por último, o trabalho é concluído e o resultado final é apresentado e discutido, sugerindo-se possíveis trabalhos futuros como complementos deste aqui presente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O intuito deste capítulo é apresentar a base teórica na qual este trabalho será fundamentado, de forma a ajudar o leitor a entender melhor a proposta do trabalho e conseguir identificar o núcleo desta monografia.

Com o intuito de introduzir o leitor ao mundo dos compósitos, a primeira seção deste capítulo, 2.1, traz uma breve apresentação sobre os compósitos confeccionados com fibra de carbono (CFC). Já em 2.2 apresentam-se as equações, muito conhecidas e consolidadas, de Maxwell. Viu-se necessário acrescentar essa seção, já que a principal área de inserção deste trabalho é o eletromagnetismo, então foi necessário acrescentar as equações, que embasam toda a teoria eletromagnética, nesta monografia.

Em 2.3, apresenta-se a teoria eletromagnética básica de propagação de ondas (transmissão, reflexão, absorção e blindagem). E por fim, na última seção, 2.4, resume-se o histórico dos trabalhos envolvendo eletromagnetismo e materiais compósitos de fibra de carbono, realizados desde 1971.

2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Durante a última década, tem-se observado uma grande inclusão de materiais compósitos na confecção de produtos no setor aeronáutico. Eles têm servido, principalmente, como substitutos na confecção de peças onde normalmente eram utilizados materiais metálicos, já que apresentam vantagens mecânicas e químicas, sendo mais leves, mais resistentes à corrosão, com custo econômico menor e apresentando maior maleabilidade (até certo ponto) do que os metais, o que facilita e aumenta as suas possíveis aplicações [1]-[3]. Os compósitos também têm sido amplamente utilizados na indústria naval e de infraestrutura, assim como na confecção de conversores de energia termoeletrônica, em materiais absorvedores de ondas eletromagnéticas e em outras diversas aplicações [6].

Materiais compósitos são, normalmente, compostos por uma combinação de diferentes materiais (metal, polímero, cerâmico, etc.) que são adicionados em diferentes quantidades, formatos e concentrações com a intenção de melhorar o produto final de forma a alcançar um objetivo para uma aplicação específica. Existe uma classificação entre os materiais compósitos, chamada Materiais Compósitos Avançados (ACM sigla em inglês para *Advanced Composite Materials*), que são

normalmente compostos por fibras de alta resistência como grafite, boro, vidro ou carbono, banhadas geralmente em resina *epóxi*.

Os compósitos mais conhecidos e trabalhados na indústria aeronáutica são compostos por fibra de carbono (*CFC*, sigla em inglês para *Carbon Fiber Composite*) [4]. Entre os CFCs encontra-se os compósitos feitos por fibra curta de carbono (*SFC*, sigla em inglês para *Short Carbon Fiber*), nanotubo de carbono (*CNT*, sigla em inglês para *Carbon Nanotube*), por carbono *black* (*CB*, sigla em inglês para *Carbon Black*) e também composto pela amplamente aplicada e que será utilizada ao decorrer deste trabalho a fibra de carbono contínua e reforçada (*RCCF*, sigla em inglês para *Reinforced Continuous Carbon Fiber*).

Os compósitos confeccionados utilizando *RCCF* são tipicamente compostos por camadas de resina, reforçada por fibras de carbono, extensas e contínuas, orientadas em uma direção específica. Normalmente esses materiais são feitos com algumas ou muitas camadas, onde, em cada camada, há fibras orientadas em direções diferentes entre si, chegando-se assim a um comportamento mais próximo do isotrópico à medida que mais camadas e direções diferentes são adicionadas. O diâmetro médio de uma fibra de carbono nesses casos é de $5,0 \pm 0,4 \mu\text{m}$ e a separação média é de $1,0 \mu\text{m}$ entre as fibras [4].

Entretanto, os materiais compósitos de fibra de carbono apresentam uma baixa condutividade elétrica quando comparados aos metais. Na verdade, a condutividade elétrica média desses materiais chega a ser 1000 vezes mais baixa do que a condutividade elétrica média da maioria dos metais [5]. Esta menor condutividade elétrica faz com que a impedância intrínseca do material não seja tão pequena quanto à impedância intrínseca de materiais metálicos (que tendem a uma impedância intrínseca igual a zero ohm), o que leva a uma reflexão com magnitude não tão alta e a uma efetividade de blindagem (SE) mais baixa, quando comparado aos metais. Isso pode se tornar um fator crítico ao se lidar com normas que regem a conformidade de compatibilidade eletromagnética no ramo.

Outra desvantagem do material compósito *RCCF* é a sua característica fundamental anisotrópica. Por mais que, ao se ter uma sobreposição significativa de camadas de *RCCF* possa, supostamente, se alcançar um comportamento quase isotrópico, quando tratadas separadamente, devido às direções e disposições das fibras de carbono na resina, acaba-se tendo um material com característica anisotrópica muito ressaltada. Esse comportamento anisotrópico do composto *RCCF*

dificulta a modelagem do material, já que as características do material não se manterão constantes em todas as direções e angulações de incidência da onda eletromagnética.

2.2 EQUAÇÕES DE MAXWELL

Serão apresentadas a seguir, de forma breve e concisa, as equações de Maxwell, já que estas são a base para o estudo da propagação de ondas eletromagnéticas e para todo o eletromagnetismo, nicho principal no qual o trabalho apresentado aqui se enquadra.

Considerando as grandezas eletromagnéticas **E**, **H**, **B**, **D**, **J**, as equações de Maxwell são dadas por [6]:

$$\text{rot}\mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\text{div}\mathbf{B} = 0 \quad (2)$$

$$\text{rot}\mathbf{E} = \frac{-\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\text{div}\mathbf{D} = \rho \quad (4)$$

Sendo estas abaixo as relações constitutivas, que complementam as equações:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (5)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (6)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (7)$$

2.3 PROPAGAÇÃO E BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA

O fenômeno estudado nesta monografia, efetividade de blindagem, se baseia em quantificar o quão bem um determinado material (ou sistema) bloqueia ou não a passagem de onda eletromagnética numa determinada faixa de frequência. A seguir serão

apresentados, brevemente, a teoria básica de propagação de ondas eletromagnéticas e os conceitos de reflexão, transmissão, absorção e blindagem eletromagnética.

A faixa de frequência utilizada neste trabalho é de 0 a 18 GHz. Esta faixa foi escolhida de acordo com as exigências da ARP5583 que rege as exigências eletromagnéticas a serem atingidas pelas aeronaves não militares.

De acordo com as equações de Maxwell, apresentadas em (1)-(4), um campo elétrico variável no tempo pode gerar um campo magnético também variável, o qual produz um campo elétrico variável, e assim por diante. Dessa forma, a propagação de energia sob a forma de onda eletromagnética é possível [8]. Abaixo se apresenta a equação de onda na forma fasorial:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) + j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)\mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{J} \quad (8)$$

A onda eletromagnética considerada neste trabalho se propaga na direção z e é composta pela componente campo elétrico em x e pela componente campo magnético em y:

$$\mathbf{E} = E_x \mathbf{i} \quad (9)$$

$$\mathbf{H} = H_y \mathbf{j} \quad (10)$$

Quando os campos elétrico e magnético são perpendiculares entre si e ambos são perpendiculares à direção de propagação, há a caracterização uma onda TEM. Considerando-se que não há variação dos campos nas direções x e y, tem-se as frentes de onda como planos perpendiculares à direção z, constituindo uma onda plana uniforme [8]. É importante ressaltar que as simulações serão feitas considerando-se que há uma onda plana e uniforme iluminando a amostra de material compósito, e incidindo perpendicularmente ao plano normal da amostra.

A equação da constante de propagação da onda é dada por:

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)} = \alpha + j\beta \quad (11)$$

Onde α e β são as constante de atenuação [Np/m] e constante de fase [rad/m], respectivamente. A impedância intrínseca do meio é definida por:

$$\eta = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} = |\eta| e^{j\theta_n} = |\eta| \angle \theta_n \quad (12)$$

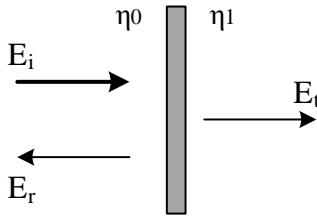
E assim, os campos elétrico e magnético são definidos, respectivamente, por:

$$E_x(z, t) = E_0 e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z) \quad (13)$$

$$H_y(z, t) = \frac{E_0}{\eta} e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z - \theta_n) \quad (14)$$

2.3.1 Reflexão e Transmissão

Figura 1 – Transmissão e reflexão de onda eletromagnética.



Fonte: A autora (2018).

Como se pode observar analisando a Figura 1, ao mudar de um meio com uma impedância intrínseca η_0 para outro meio com impedância η_1 , parte da energia dessa onda será transmitida e a outra parte, refletida, caso não haja casamento entre as impedâncias ($\eta_0 \neq \eta_1$). As equações relacionadas a esse comportamento são apresentadas nas equações 15, 16, 17 e 18:

$$E_r = \Gamma E_i \quad (15)$$

Sendo Γ o coeficiente de reflexão e definido por:

$$\Gamma = \frac{\eta_1 - \eta_0}{\eta_1 + \eta_0} \quad (16)$$

E o coeficiente de transmissão τ , definido por:

$$\tau = \frac{2\eta_1}{\eta_1 + \eta_0} = \Gamma + 1 \quad (17)$$

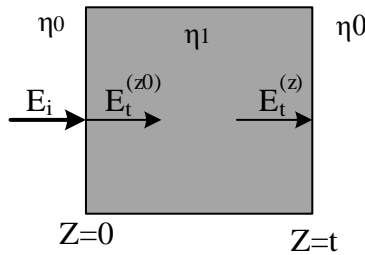
$$E_t = \tau E_i \quad (18)$$

Onde E_i , E_r e E_t são, respectivamente, campo elétrico incidente, refletido e transmitido.

2.3.2 Absorção

A absorção de uma onda eletromagnética por um material acontece quando a onda, ou parte dela, atravessa do meio para este material, como se pode observar na Figura 2, e a energia dela diminui ou se extingue antes de percorrer todo o material [9]. A energia da onda acaba sendo absorvida pelas estruturas físicas ou químicas do material.

Figura 2 – Absorção de onda eletromagnética.



Fonte: A autora (2018).

As equações 19, 20 e 21 representam o equacionamento do fenômeno de absorção de uma onda eletromagnética, quando esta atravessa de um meio η_0 para um material com impedância intrínseca η_1 .

$$E_t(z) = E_t^{z0} e^{-\alpha z} \quad (19)$$

$$\frac{E_t(z)}{E_t^{z0}} = e^{-\alpha z} \quad (20)$$

$$\alpha = -\frac{1}{z \ln e} \ln \left(\frac{E_t(z)}{E_t^{z0}} \right) \quad (21)$$

Onde α representa a constante de atenuação do material.

2.3.3 Blindagem Eletromagnética

O resultado final esperado deste trabalho consiste na obtenção da efetividade de blindagem do material compósito, aqui modelado, através de programas simuladores de fenômenos eletromagnéticos. Sendo assim, é importante definir blindagem eletromagnética, de forma que os leitores possam entender o que se é esperado nos resultados desta monografia.

A blindagem eletromagnética é usada para mitigar ou eliminar a passagem de energia eletromagnética de um ponto para o outro, através de um determinado material. Ao se trabalhar com sistemas eletroeletrônicos, é necessário encontrar soluções para que esses sistemas não sofram e nem produzam interferências eletromagnéticas que possam prejudicar o funcionamento desse sistema. Para prevenir essas interferências, existem diversas medidas corretivas a serem aplicadas, como por exemplo, a disposição dos elementos do sistema eletroeletrônico, a utilização de filtros capacitivos, os desenhos das trilhas dos circuitos eletrônicos, entre outros.

Em algumas situações, a única solução possível é a aplicação de uma blindagem eletromagnética, a qual irá atenuar parcial ou totalmente a energia de uma onda eletromagnética, antes de chegar ao sistema eletroeletrônico a ser protegido. Essa blindagem pode ocorrer por absorção ou por reflexão.

A efetividade de blindagem, ou comumente conhecida em inglês como *Shielding Effectiveness* (SE), é o quão bem certo material ou sistema analisado consegue impedir a passagem de uma onda eletromagnética.

$$SE = 20 \log \left(\frac{E_i}{E_t} \right) = 20 \log \left(\frac{1}{\tau} \right) = 20 \log \left(\frac{\eta_1 + \eta_0}{2\eta_1} \right) \quad (22)$$

Entretanto, é importante ressaltar que os resultados deste trabalho serão apresentados em função do coeficiente de reflexão das amostras que serão analisadas. Essa “equivalência” de análise entre efetividade de blindagem e reflexão é explicada na secção 2.3.3.2 Blindagem por Reflexão (SE_r), deste capítulo.

2.3.3.1 Blindagem por Absorção (SE_a)

Sabendo-se que:

$$SE_a = 20 \log \left(\frac{E_t^{z0}}{E_t^z} \right) \quad (23)$$

E substituindo (20) em (24) tem-se:

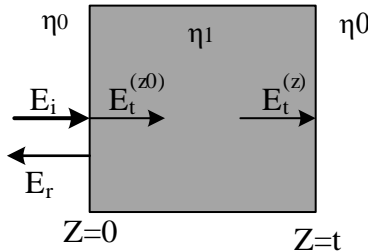
$$SE_a = 20 \log \left(e^{\alpha z} \right) \quad (24)$$

$$SE_a = 20 \alpha z \log(e) \quad (25)$$

$$SE_a = 8,686 \alpha z \quad (26)$$

2.3.3.2 Blindagem por Reflexão (SE_r)

Figura 3 – Blindagem eletromagnética por efeito de reflexão.



Fonte: A autora (2018).

A Figura 3 esquematiza o efeito de blindagem eletromagnética por reflexão, onde o vetor $\mathbf{E_r}$ representa a soma de todas as reflexões que ocorrem no material de impedância intrínseca η_1 , a partir das múltiplas reflexões que a onda eletromagnética sofre ao se propagar pelo meio. E de acordo com a equação (17) tem-se que:

$$\eta_0 > \eta_1 \rightarrow \Gamma < 0 \quad (27)$$

Conhecendo que ao se trabalhar com materiais compósitos de fibra de carbono, considera-se normalmente condutividade elétrica $\sigma \cong 10^4$ S/m para as fibras, tem-se, ao se analisar a definição de SE dada em (23), que:

$$\eta_0 > \eta_1 \rightarrow SE > 0 \quad (28)$$

E considerando que a condutividade elétrica das fibras será $\sigma \cong 10^4$ S/m, tem-se também:

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 370\Omega \quad (29)$$

$$\eta_1 = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} \quad (30)$$

Onde $\omega\mu \leq 10^2$ S/m. Ou seja, $\eta_0 > \eta_1$ em todos os casos apresentados nesta monografia, já que a menor diferença entre μ e σ que haverá será $10^4 > 10^2$. Dessa forma, é garantido que em todos os casos apresentados neste trabalho $\Gamma < 0$ de acordo com (17) e (28). Além disso, sabe-se que quando a magnitude do coeficiente de reflexão crescer, a efetividade de blindagem crescerá também (22).

Dessa forma, define-se a partir de agora que quando referir-se à magnitude do coeficiente de reflexão, se estará referindo também à efetividade de blindagem em questão. Por esta razão, é possível fazer a análise da efetividade de blindagem, se ela crescerá ou diminuirá, se ela será de maior ou menor valor comparativo, simplesmente analisando os gráficos de magnitude do coeficiente de reflexão.

2.4 TRABALHOS ANTERIORES

Devido à complexa estrutura dos materiais compósitos, algumas técnicas foram estudadas e introduzidas, ao passar dos anos, para ajudar a simplificar a sua análise. O estudo mais antigo de eletromagnetismo envolvendo materiais CFC é datado de 1971 [5], o qual focava na condutividade elétrica homogênea de uma única camada do material compósito analisado [10]. Em 1972, experimentos destrutivos e não destrutivos foram realizados para se avaliar os efeitos de descargas elétricas (*lightning*) em painéis de CFC [11]. Após, em 1974, foi modelada uma lâmina de CFC a partir das propriedades mecânicas, térmicas e elétricas previamente estabelecidas. Este modelo era baseado em fibras mergulhadas em um meio dielétrico [12]. Calculou-se, em 1978, a efetividade de blindagem (SE) de painéis de CFC usando condições de contorno, as quais relacionavam os campos elétricos e magnéticos tangenciais dos dois lados do painel analisado [13]. Em 1980, começou-se o estudo do impacto de se substituir metais por placas de CFC na construção de aeronaves [14].

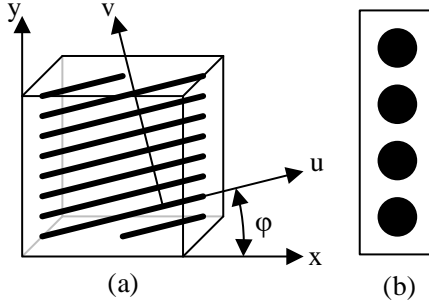
A partir de 1993, estudos são iniciados sobre as propriedades de blindagem de materiais compósitos RCCF de multicamadas, utilizando-se o modelo *bulk* anisotrópico homogêneo como base [15], [16] e [17]. Neste modelo, cada camada do compósito é representada por um tensor anisotrópico de permissividade. Em [2], apresentou-se uma equação integral periódica que foi empregada para analisar um material RCCF de camada única. O problema deste método se apresentou na alta necessidade de memória de processamento [4]. Já em 1998 foi proposto, para alta precisão em altas frequências, um modelo baseado em correntes de filamento, porém este modelo não conseguia manter sua alta precisão para todos os possíveis ângulos de incidência.

Entretanto, Holloway apresentou em 2005 um modelo semelhante ao modelo *bulk*. A diferença se apresentava ao terem-se três tensores de permissividade por camada, em vez de um. Este modelo ficou comumente conhecido como “3-layer homogêneo e não homogêneo” [1], [20]. Baseado no trabalho de Holloway, Mehdipour [4] calculou a efetividade de blindagem para materiais CFC em 2011. E é a partir desses últimos trabalhos citados que o trabalho aqui presente será baseado.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 OS MODELOS DE EQUIVALÊNCIA DE HOLLOWAY

Figura 4 - Esquemático de composto RCCF visão frontal (a) e lateral (b).



Fonte: A autora (2018).

Holloway *et al.*, em [1], apresentou dois modelos equivalentes para materiais compostos multicamadas RCCF, os quais são conhecidos como “3-layer homogêneo”, esquematizado pelas Figuras 4 e 5, e “3-layer não homogêneo”. Essas equivalências vieram como uma variação mais precisa do modelo 1-layer homogêneo, no qual cada camada do material composto era representada por apenas um tensor de permissividade.

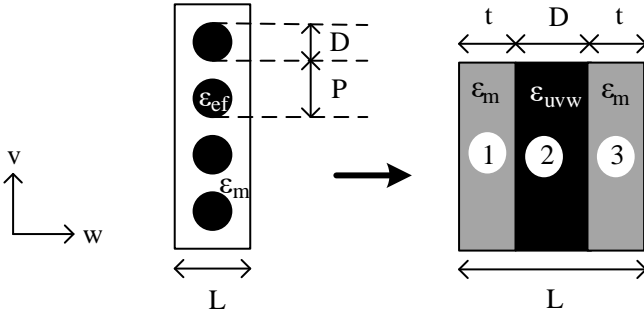
A premissa básica para tornar possíveis essas simplificações já havia sido mostrada em trabalhos anteriores [1], a qual se considerava o material RCCF como uma estrutura periódica. Ao se considerar um material uma estrutura periódica, sabe-se que, se o período de repetição dessa estrutura periódica for muito menor que o comprimento de onda utilizado, a estrutura (material) pode ser aproximada por um meio uniforme anisotrópico com um valor efetivo de condutividade elétrica. Esse meio possuirá campos elétrico e magnético médios de ordem zero iguais a [1]:

$$\nabla \times (\mathbf{E}^0)_m = -j\omega[\mu](\mathbf{H}^0)_m \quad (31)$$

$$\nabla \times (\mathbf{H}^0)_m = j\omega[\varepsilon](\mathbf{E}^0)_m \quad (32)$$

Onde $[\mu]$ e $[\varepsilon]$ são os tensores de permeabilidade e permissividade, respectivamente, que caracterizam esse meio. Como, nesse caso, os campos médios tratarão o meio periódico como uma região efetiva anisotrópica com tensores $[\mu]$ e $[\varepsilon]$ e condutividade elétrica efetiva do meio $[\sigma_{ef}]$, os coeficientes de reflexão e transmissão podem ser obtidos através das equações (13), (17) e (18), utilizando métodos clássicos [1].

Figura 5 – Esquemático explicativo do modelo 3-layer homogêneo.



Fonte: A autora (2018).

Os modelos de 3-layers propostos em [1] dividem em três regiões cada camada, de espessura L , do material RCCF, como esquematizado pela Figura 5. Seria como se a onda ao atravessar cada camada de RCCF enxergasse três regiões diferentes. As regiões periféricas (1 e 3) representam a resina epóxi, que seriam consideradas pela onda como um *layer* homogêneo com propriedades características constantes, sendo essas as mesmas do material epóxi. Essas regiões teriam espessura t , $\varepsilon = \varepsilon_m$, $\mu = \mu_m$ e $\sigma = 0$. Enquanto que a região central (2) representa as fibras de carbono, com espessura D e $\varepsilon = \varepsilon_{ef}$, $\mu = \mu_{ef}$ e $\sigma = \sigma_{ef}$.

Sabe-se que esse tipo de meio se comporta como um material uniaxial anisotrópico e homogêneo [1], em que seus tensores de permeabilidade e permissividade relativa são:

$$[\bar{\mu}]_{uvw} = \begin{bmatrix} \mu_u & 0 & 0 \\ 0 & \mu_v & 0 \\ 0 & 0 & \mu_w \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$\left[\bar{\varepsilon}_r \right]_{uvw} = \begin{bmatrix} \varepsilon_u & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_v & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_w \end{bmatrix} \quad (34)$$

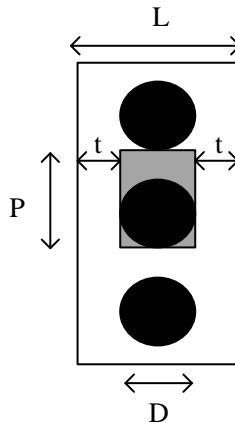
E também que a condutividade elétrica em cada camada de RCCF é alta ao longo das fibras (σ_u) e baixa tanto na direção perpendicular às fibras (σ_v) quanto na direção de propagação perpendicular às camadas de RCCF (σ_w) [4]. Sendo assim $\frac{\sigma_u}{\sigma_v} \gg 1$ e $\frac{\sigma_u}{\sigma_w} \gg 1$, e tem-se como tensor de condutividade elétrica:

$$\left[\bar{\sigma} \right]_{uvw} = \begin{bmatrix} \sigma_u & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_v & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_w \end{bmatrix} \quad (35)$$

Onde u, v e w são as coordenadas principais do sistema (u é paralela às fibras) e x, y e z são as coordenadas globais do sistema (a onda eletromagnética incidente terá a componente **E** em x e a componente **H** em y, ou vice-versa).

No modelo homogêneo é considerado que a região 2 tem um ε_{ef} constante durante toda a extensão de D.

Figura 6 – Volume relativo ocupado pela fibra “g” para o modelo 3-layer homogêneo.



Fonte: A autora (2018).

E mostra-se em [1] e em [4] que:

$$\varepsilon_u^{-1} = (1 - g) \varepsilon_m^{-1} + g \varepsilon_{ef}^{-1} \quad (36)$$

$$\varepsilon_v = \varepsilon_w = (1 - g) \varepsilon_m + g \varepsilon_{ef} \quad (37)$$

$$\mu_u^{-1} = (1 - g) \mu_m^{-1} + g \mu_{ef}^{-1} \quad (38)$$

$$\mu_v = \mu_w = (1 - g) \mu_m + g \mu_{ef} \quad (39)$$

Onde P é o período de repetição das fibras e g é o volume relativo ocupado pela fibra, como mostra a Figura 6, (razão entre a área da secção transversal da fibra pela área total da secção transversal da região central) [1]:

$$g = \frac{\pi D}{4P} \quad (40)$$

Já no modelo não homogêneo, a diferença é que $\varepsilon_{ef} = f(w)$, onde a permissividade aumenta de t até $D/2$ e decai de $D/2$ até $L - t$. Como a fibra de carbono é representada como um cilindro, a maior “densidade” de fibra de carbono estaria bem no meio da região central, fazendo-se assim com que g , no modelo 3-layer não homogêneo seja [1]:

$$g = \frac{2\sqrt{Dw - w^2}}{P} \quad (41)$$

Onde w varia de zero até D .

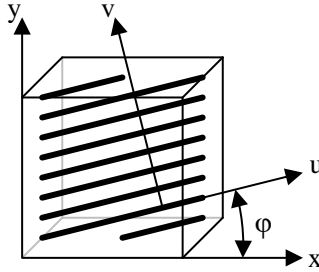
Para a confecção deste trabalho, escolheu-se utilizar o modelo “3-layer homogêneo” de Holloway *et al.* Por mais que o modelo não homogêneo seja mais preciso para altas frequências, o resultado obtido utilizando-se o modelo 3-layer homogêneo já é muito satisfatório. Outro ponto a se considerar é: como o objetivo principal deste trabalho é apresentar uma modelagem para um material RCCF de quatro camadas, haverá uma diferença ainda mais sutil entre os dois modelos do que se a

modelagem fosse feita para apenas uma camada de RCCF, como pode ser notado nos resultados de [1] e [4].

3.2 PROPAGAÇÃO EM MEIO ANISOTRÓPICO

Como apresentado no item anterior, neste trabalho usa-se com dois sistemas de coordenadas diferentes. O sistema de coordenadas principal acompanha as angulações das fibras de carbono em cada camada, enquanto o sistema de coordenadas global está alinhado com a onda plana incidente ao sistema.

Figura 7- Coordenadas globais xyz e coordenadas principais uvw



Fonte: A autora (2018).

Como mostra a Figura 7, os planos xy e uv estão defasados por um ângulo ϕ , enquanto z e w são eixos paralelos. Desta forma, é importante ressaltar a necessidade de se representar os tensores que estão inicialmente em uvw, no sistema global xyz. Sendo assim, tem-se:

$$\left[\bar{a} \right]_{uvw} = \begin{bmatrix} a_u & 0 & 0 \\ 0 & a_v & 0 \\ 0 & 0 & a_w \end{bmatrix} \quad (42)$$

Onde $\left[\bar{a} \right]$ representa um tensor genérico nas coordenadas uvw. É possível representar tal tensor nas coordenadas globais xyz da seguinte forma [4].

$$\begin{bmatrix} \bar{a} \end{bmatrix}_{xyz} = T \begin{bmatrix} a_u & 0 & 0 \\ 0 & a_v & 0 \\ 0 & 0 & a_w \end{bmatrix} T^{-1} \quad (42)$$

Onde T é a matriz rotacional de transformação de coordenadas com z sendo o eixo de rotação.

$$T = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (43)$$

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (44)$$

Dessa forma, tem-se então, como tensor genérico nas coordenadas globais, a seguinte matriz não diagonal:

$$\begin{bmatrix} \bar{a} \end{bmatrix}_{xyz} = \begin{bmatrix} a_{xx} & a_{xy} & 0 \\ a_{yx} & a_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & a_{zz} \end{bmatrix} \quad (45)$$

E assim, de maneira análoga, pode-se fazer para o tensor de permissividade relativa, permeabilidade e condutividade elétrica:

$$\begin{bmatrix} \bar{\epsilon}_r \end{bmatrix}_{xyz} = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & 0 \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (46)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{\mu} \end{bmatrix}_{xyz} = \begin{bmatrix} \mu_{xx} & \mu_{xy} & 0 \\ \mu_{yx} & \mu_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{zz} \end{bmatrix} \quad (47)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{\sigma} \end{bmatrix}_{xyz} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & 0 \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (48)$$

Onde:

$$a_{xx} = a_v \sin^2 \varphi + a_u \cos^2 \varphi \quad (49)$$

$$a_{yy} = a_v \cos^2 \varphi + a_u \sin^2 \varphi \quad (50)$$

$$a_{zz} = a_w \quad (51)$$

$$a_{xy} = a_{yx} = (a_u - a_v) \sin \varphi \cos \varphi \quad (52)$$

Sabe-se que o tensor de permissividade de um meio com perdas é composto por elementos complexos e é dependente não só da permissividade relativa, como também da condutividade elétrica e da frequência, conforme mostra a equação:

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon_0 \left(\bar{\varepsilon}_r + \frac{\bar{\sigma}}{j\omega\varepsilon_0} \right) \quad (53)$$

Uma vez que o processo de identificação das permissividades relativas e o processo de transformação de coordenadas uvw para xyz são todos processos lineares, é possível encontrar $\bar{\varepsilon}_r$ e $\bar{\sigma}$ separadamente, reunindo-os ao final, utilizando o teorema da superposição, resultando em:

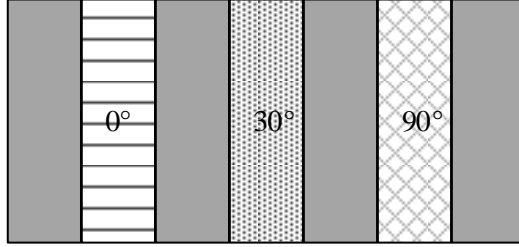
$$[\bar{\varepsilon}] = \varepsilon_0 \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} + \frac{\sigma_{xx}}{j\omega\varepsilon_0} & \varepsilon_{xy} + \frac{\sigma_{xy}}{j\omega\varepsilon_0} & 0 \\ \varepsilon_{yx} + \frac{\sigma_{yx}}{j\omega\varepsilon_0} & \varepsilon_{yy} + \frac{\sigma_{yy}}{j\omega\varepsilon_0} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} + \frac{\sigma_{zz}}{j\omega\varepsilon_0} \end{bmatrix} \quad (54)$$

E assim, com os seus devidos valores encontrados e substituídos, os tensores $[\bar{\mu}]$ e $[\bar{\varepsilon}]$ serão utilizados para caracterizar cada camada de RCCF no software de simulação computacional eletromagnética. Cada ângulo referente às posições das fibras de carbono ($\varphi = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$) caracterizará um “novo material” na biblioteca do software, com características eletromagnéticas diferentes, representando-se assim, a anisotropia do material aqui estudado.

Teremos então, três *layers* representativos para cada camada de RCCF (resina, fibra, resina), quando estas estiverem sendo tratadas individualmente. Quando estivermos tratando de uma peça multicamadas de RCCF, formada por n camadas, nós teremos representados $2n+1$ *layers*, como mostra o esquemático abaixo (Figura 8). Desta forma a realidade de construção da peça será mais bem representada.

Para exemplificar, mostram-se abaixo os tensores de permissividade de uma amostra de material compósito RCCF hipotético, com $D = 0.5$ mm, $P = 0.7$ mm, $L = 1$ mm, $\varepsilon_m = 2\varepsilon_0$, $\varepsilon_f = 4\varepsilon_0$ e $[\bar{\sigma}]_{uvw} = [10000, 0.1, 0.2]$ S/m [4], com as direções das fibras defasadas em relação ao eixo global xy de $\varphi = 0^\circ$ e 30° , que será utilizada no próximo capítulo para obtenção dos resultados desta monografia. Como $\mu_m = \mu_f = \mu_0$ em todas as situações, o tensor de permeabilidade não será apresentado aqui.

Figura 8 – Esquemático para modelo de compósito de três camadas.



Fonte: A autora (2018).

Para $\varphi = 0^\circ$ tem-se:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon \end{bmatrix}_{0^\circ} = \varepsilon_0 \begin{bmatrix} 3,1220 + \frac{10000}{j\omega\varepsilon_0} & 0 & 0 \\ 0 & 2,7797 + \frac{0,1}{j\omega\varepsilon_0} & 0 \\ 0 & 0 & 3,1220 + \frac{0,2}{j\omega\varepsilon_0} \end{bmatrix} \quad (55)$$

E para $\varphi = 30^\circ$:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon \end{bmatrix}_{30^\circ} = \varepsilon_0 \begin{bmatrix} 3,0364 + \frac{7500}{j\omega\varepsilon_0} & 0,1482 + \frac{4330}{j\omega\varepsilon_0} & 0 \\ 0,1482 + \frac{4330}{j\omega\varepsilon_0} & 2,8653 + \frac{2500}{j\omega\varepsilon_0} & 0 \\ 0 & 0 & 3,1220 + \frac{0,2}{j\omega\varepsilon_0} \end{bmatrix} \quad (56)$$

No Apêndice A encontram-se, documentados, todos os tensores de permissividade utilizados ao longo deste trabalho.

3.3 MODOS ORDINÁRIO E EXTRAORDINÁRIO

Ao ser excitado por uma onda plana, um meio anisotrópico apresentará dois modos distintos, com constantes de propagação

diferentes, chamados de modo ordinário e extraordinário [4]. A equação que caracteriza este problema tem como solução, em todos os casos, uma superfície esférica e um elipsoide. Essas superfícies podem ser cortadas em planos, e esses planos serão formados por um círculo e uma elipse. Em alguns planos haverá o encontro entre as duas formas geométricas, enquanto em outros, não. Nos planos onde o encontro entre o círculo e a elipse acontece, há apenas uma constante de propagação e atribui-se o nome a esse plano de “eixo óptico”.

Observando-se (56) e (57), percebe-se que em $\varphi = 0^\circ$ as componentes xy e yx das matrizes são nulas. Isso ocorre porque o eixo uv (coordenada principal) é paralelo ao eixo xy (coordenada global) quando $\varphi = 0^\circ$. Quando isso ocorre, não há acoplamento entre os modos extraordinário e ordinário. Já quando $\varphi \neq 0^\circ$ ou $\varphi \neq 90^\circ$ esse acoplamento existe, fazendo com que as componentes xy e yx dos tensores não sejam nulas, como no caso $\varphi = 30^\circ$.

4 RESULTADOS

Ao se simular um material anisotrópico, como o estudado neste trabalho, pode-se trabalhar com uma modelagem em nível de detalhamento altíssimo ou baixíssimo. Esta decisão será tomada pelo projetista e ele terá que levar em conta a precisão requerida aos resultados, a capacidade de processamento da máquina na qual a simulação rodará e o tempo disponível para o processo de simulação.

Trabalhando-se no setor aeronáutico, tem-se objetos de enormes dimensões e alta complexidade em detalhes. Dessa forma, a autora propôs a confecção deste trabalho com o objetivo de estudar uma metodologia adequada para simplificar a modelagem de um material anisotrópico que vem sendo amplamente utilizado no meio aeronáutico: compósito de fibra de carbono.

Sendo assim, foi escolhido como metodologia, o modelo apresentado por [1]: modelo de *3-layers* homogêneo, como explicado anteriormente. Em um primeiro momento, será feita uma comparação entre alguns resultados obtidos por [1] e os mesmos resultados obtidos pela autora, de forma a se validar o método utilizado e as simulações feitas.

Em seguida, serão apresentadas as magnitudes dos coeficientes de reflexão de materiais compósitos RCCF hipotéticos de camada única com angulações distintas. Depois de realizada as análises com as amostras de camadas únicas, serão feitas combinações entre os ângulos, de forma que tenham-se amostras de duas camadas para se analisar as mudanças na magnitude das reflexões e quais são as mais indicadas para o propósito de blindagem buscado. A análise para compósitos com quatro ou mais *layers* também será feita, além de um destaque para camadas com ângulos 0° e 90° . Por último, será explicado o conceito de Tecido RCCF e apresentado uma adaptação do modelo *3-layer* homogêneo de [1] para este tipo de CFC.

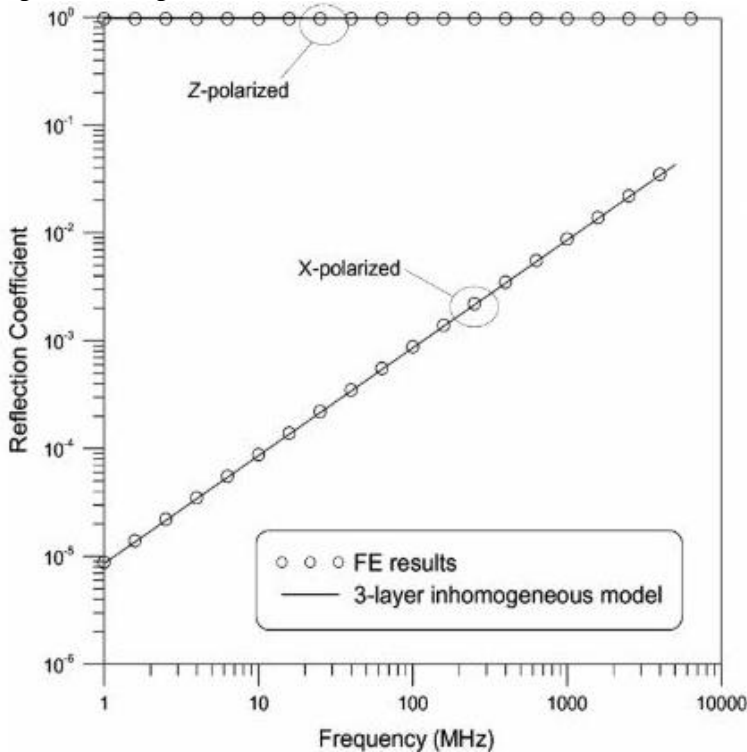
4.1 VALIDAÇÃO DO MODELO

Com o intuito de validar a aplicação do modelo *3-layer* homogêneo, que será utilizado pela autora neste texto, foi realizada uma comparação entre alguns resultados obtidos por Holloway *et al.* em [1] e os resultados obtidos pela autora, utilizando como ferramenta o software CST Studio Suite, considerando, exatamente, os mesmos dados utilizados em [1]. Para realização das simulações no software CST Studio Suite foi utilizado o módulo de estruturas periódicas dentro do

módulo “*MW and RF and Optical*”. Dentro desses módulos foi utilizado o “*Frequency Domain Solver*” como *solver* para as simulações e como condição de contorno foi utilizada a condição de contorno periódica de Floquet (uma opção existente dentro deste módulo no CST).

Considerando-se os seguintes dados referentes a um material compósito RCCF hipotético, retirados de [1]: “material compósito de camada única com $D = 0,05 \text{ mm}$, $P = 0,1 \text{ mm}$, $L = 0,75 \text{ mm}$, $\varepsilon_m = \varepsilon_f = 2,0\varepsilon_0$ e $\sigma = 1.10^4 \text{ S/m}$ ”, tem-se o gráfico apresentado na Figura 9:

Figura 9 – Magnitude do coeficiente de reflexão.

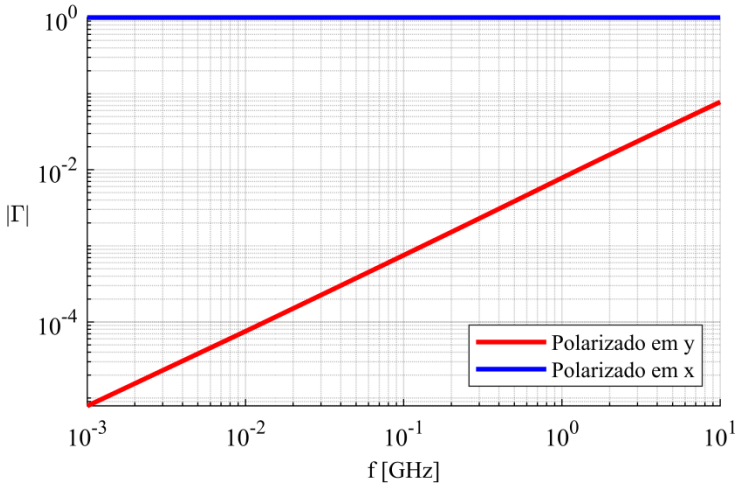


Fonte: “*Analyzing Carbon-Fiber Composite Materials With Equivalent-Layer Models*”, Holloway *et al.*, (2005) [1].

É importante ressaltar a diferença entre as notações utilizadas em [1] e as utilizadas neste texto. Quando em [1] se fala sobre “*z-polarized*” e “*x-polarized*”, o autor está se referindo ao campo elétrico polarizado

paralelamente à direção das fibras em 0° e campo elétrico polarizado perpendicularmente a direção das fibras em 0° , respectivamente. Neste texto, a autora trata como polarização paralela às fibras em 0° como polarização em x, e polarização em y para o campo elétrico polarizado perpendicularmente às fibras em 0° .

Figura 10 - Magnitude do coeficiente de reflexão obtido no CST Studio.



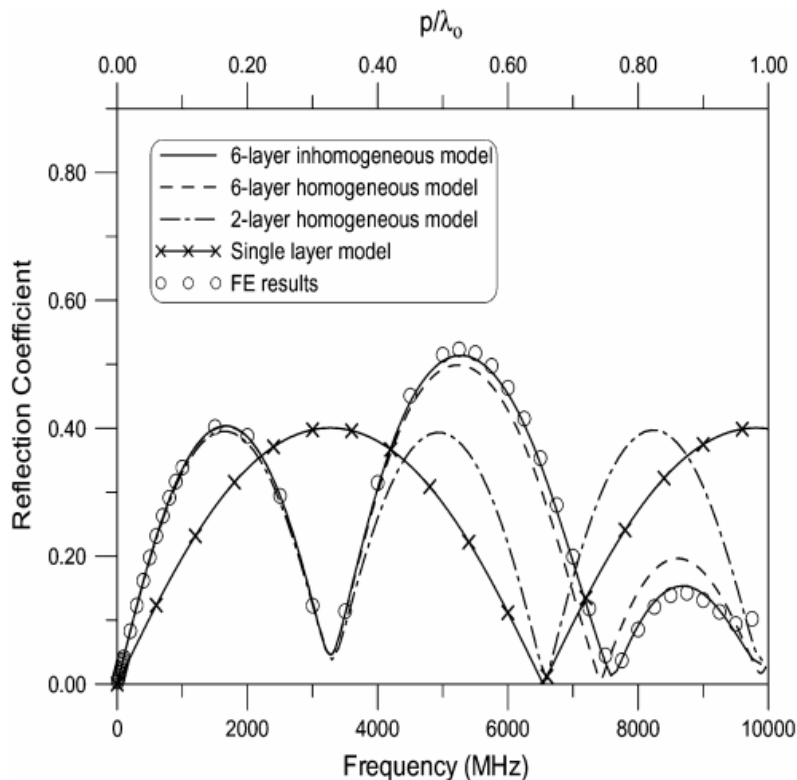
Fonte: A autora (2018).

Como é possível observar na Figura 10, que foi obtida através de simulações realizadas pela própria autora, utilizando o software CST Studio Suite, aplicando a teoria aqui apresentada no Capítulo 3, tem-se exatamente o mesmo comportamento que a Figura 9, para a mesma amostra hipotética de material compósito RCCF.

Percebe-se que neste exemplo apresentado por Holloway *et al.*, a amostra de compósito se comporta de forma similar a um metal quando o campo elétrico está polarizado em x (direção das fibras, neste caso em particular). Entretanto, esse “efeito placa” não é verificado quando o campo elétrico incidente é perpendicular às fibras desta camada de CFC.

O próximo exemplo também é retirado de [1], e mostra o comportamento da magnitude do coeficiente de reflexão de uma amostra hipotética de RCCF de duas camadas ($0^\circ/90^\circ$) com $L = 15 \text{ mm}$, $D = 7,5 \text{ mm}$, $t = 3,75 \text{ mm}$, $P = 15 \text{ mm}$, $\varepsilon_m = 2,0\varepsilon_0$, $\varepsilon_f = 4,0\varepsilon_0$ e $\sigma = 0 \text{ S/m}$.

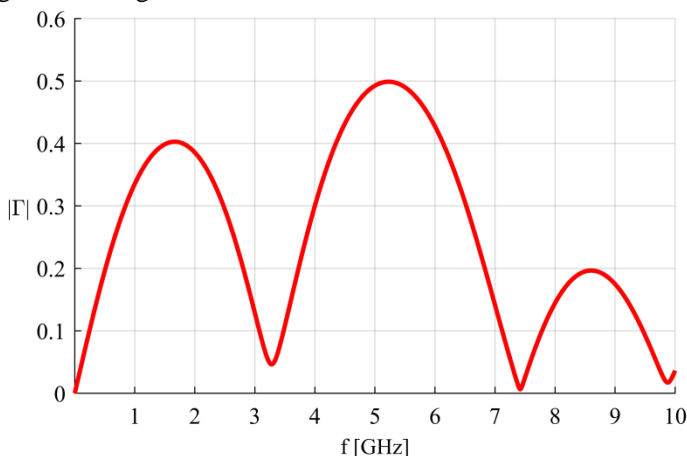
Figura 11- Magnitude do coeficiente de reflexão.



Fonte: “Analyzing Carbon-Fiber Composite Materials With Equivalent-Layer Models”, Holloway *et al.*, (2005) [1].

Na Figura 11, foram utilizados os modelos 3-layer homogêneo e não homogêneo, 1-layer homogêneo e elementos finitos, aplicados para as duas camadas de material compósito. De forma semelhante, para alcançar o mesmo resultado, a autora, desta monografia simulou a mesma amostra de material compósito utilizando da adaptação do método de 3-layer homogêneo para a verificação no CST Studio Suite.

Figura 12- Magnitude do coeficiente de reflexão obtido no CST Studio.



Fonte: A autora (2018).

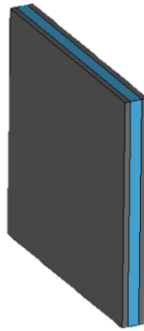
Consegue-se observar a semelhança entre a curva “*6-layer homogeneous model*” apresentado na Figura 11 de Holloway *et al.* e a curva apresentada na Figura 12. Nesta análise, tem-se o campo elétrico polarizado em y, e consegue-se observar a coerência entre os pontos de ressonância entre os dois gráficos.

Outros exemplos (os quais não foram apresentados aqui) foram recriados pela autora, para confirmar que a sua aplicação do método *3-layer* homogêneo de [1], no software de simulação CST Studio Suite, estava correta. Acreditando-se na veracidade do método explicado, aplicado e demonstrado, considera-se então, que a partir daqui, os resultados que virão a ser demonstrados neste trabalho estão corretos e estariam de acordo com a realidade, caso as amostras simuladas fossem confeccionadas e testadas em laboratórios com equipamentos apropriados para a realização destes testes.

4.2 CAMADAS ÚNICAS

Ao se trabalhar com materiais compósitos RCCF é comum lidar com materiais compostos por multicamadas. Para assegurar as propriedades mecânicas requeridas para o projeto no qual o material compósito está sendo utilizado, é comum se utilizar quantidades diferentes de camadas por composto.

Figura 13 - Modelo esquemático de material compósito de camada única utilizando a aproximação homogênea de *3-layers*.

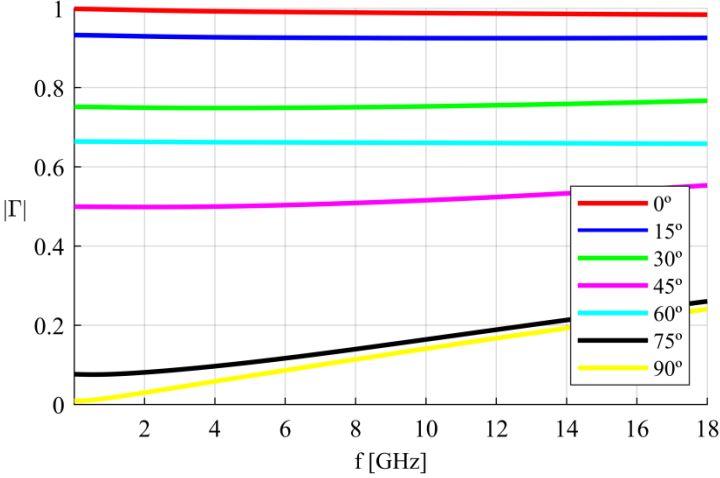


Fonte: A autora (2018).

Cada camada de RCCF contribui de alguma forma, com a efetividade de blindagem final do material. A Figura 13 representa o modelo esquemático utilizado no software CST Studio Suite para representar um material compósito RCCF de camada única. Sendo assim, algumas direções angulares das fibras serão melhores para a blindagem de uma onda plana uniforme do que outras. Nos gráficos apresentados nas Figura 14 e Figura 15, temos a comparação da magnitude dos coeficientes de reflexão para os ângulos 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° e 90° de um material compósito com $L = 1\text{ mm}$, $D = 0,5\text{ mm}$, $P = 0,7\text{ mm}$, $t = 0,25\text{ mm}$, $\varepsilon_m = 2,0\varepsilon_0$, $\varepsilon_f = 4,0\varepsilon_0$ e $\bar{\sigma} = (10000, 0,1, 0,2)$, com \mathbf{E} polarizado em x e em y, respectivamente.

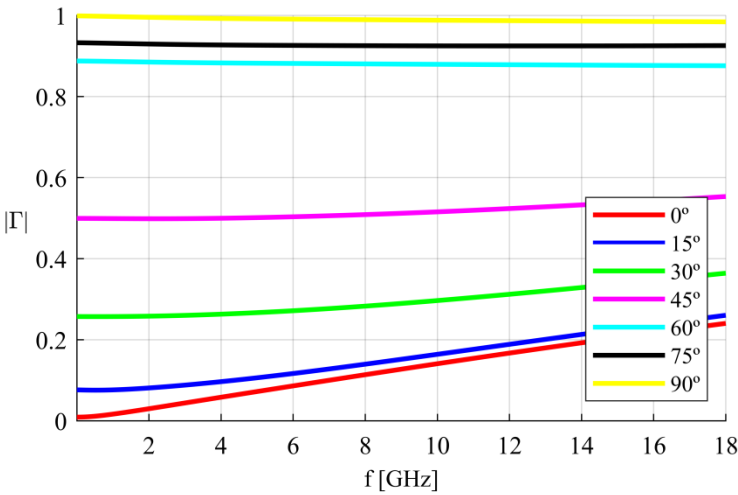
Como é possível observar nas Figura 14 e Figura 15, tem-se o *layer* 0° com a maior magnitude de coeficiente de reflexão quando \mathbf{E} é polarizado em x (paralelo às fibras em 0°) e o *layer* 90° com a maior magnitude quando \mathbf{E} está polarizado em y (paralelo às fibras em 90°). Isso acontece já que estando em paralelo com as fibras, \mathbf{E} consegue acoplar melhor nas fibras, induzindo assim uma corrente nas fibras e essa corrente induzida gerará um campo rotacional oposto ao incidente, o que resultará no cancelamento dos campos, fazendo com que assim, a onda não consiga “ultrapassar” o *layer* de RCCF.

Figura 14 – Gráfico comparativo dos coeficientes de reflexão de material compósito de camada única com \mathbf{E} polarizado em x.



Fonte: A autora (2018).

Figura 15 - Gráfico comparativo dos coeficientes de reflexão de material compósito de camada única com \mathbf{E} polarizado em y.

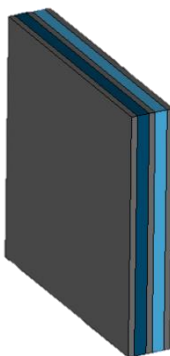


Fonte: A autora (2018).

Entretanto, esse comportamento só funciona de forma efetiva para as polarizações paralelas às fibras. Sendo assim, encontra-se a necessidade de fazer combinações entre camadas com ângulos diferentes, para aumentar o coeficiente de reflexão tanto para **E** polarizado em x como em y.

4.3 CAMADAS DUPLAS

Figura 16 - Modelo esquemático de material compósito de camada dupla utilizando a aproximação homogênea de *3-layers*.

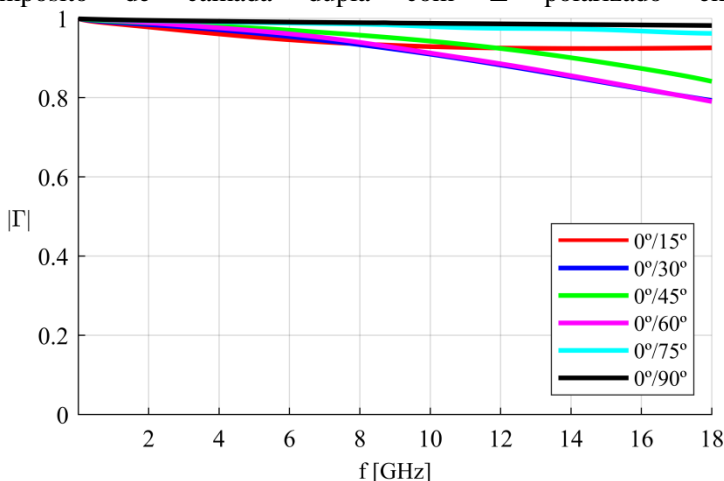


Fonte: A autora (2018).

Para esta secção de análise da combinação dupla entre camadas (representada esquematicamente pela Figura 16), foi escolhido adotar o *layer* 0° como base para as combinações. Sendo assim, têm-se aqui apresentadas as combinações $0^\circ/15^\circ$, $0^\circ/30^\circ$, $0^\circ/45^\circ$, $0^\circ/60^\circ$, $0^\circ/75^\circ$ e $0^\circ/90^\circ$.

Analisando essas combinações de *layers*, consegue-se observar nas Figura 17 e Figura 18 que a magnitude do coeficiente de reflexão, para **E** paralelo e perpendicular a 0° , é consideravelmente maior para a combinação $0^\circ/90^\circ$ do que para as outras combinações feitas durante toda a faixa de frequência analisada.

Figura 17 - Gráfico comparativo dos coeficientes de reflexão de material compósito de camada dupla com E polarizado em x .



Fonte: A autora (2018).

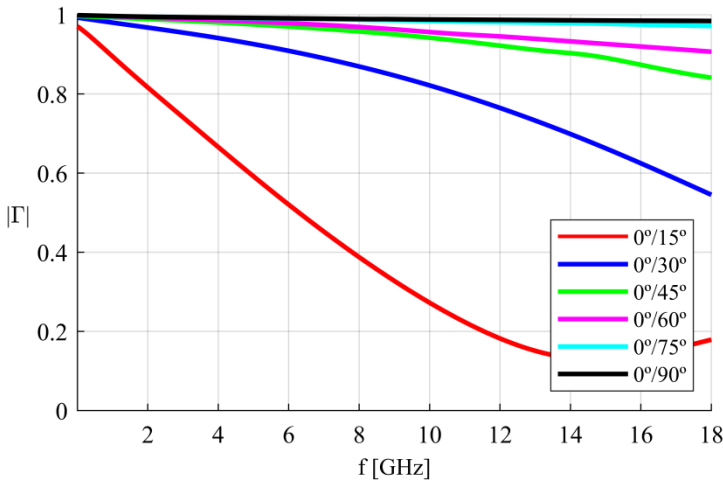
Analisando o coeficiente de onda estacionária (VSWR) da combinação $0^\circ/90^\circ$, tem-se um valor máximo de 2000 que se mantém das frequências mais baixas até 30 MHz, onde começa a decair até chegar a um valor de 100 em 18 GHz. Por mais que exista esse decaimento do VSWR, esse valor ainda é muito melhor do que quando comparado às outras combinações, já que essas apresentam um VSWR mínimo menor que 10 em 18 GHz.

Com essa análise, foi decidido analisar o desempenho de compósitos formados por quatro camadas de RCCF, mantendo agora como base para o compósito os *layers* $0^\circ/90^\circ$, já que esta combinação se mostrou ser a mais efetiva para camadas duplas, em termos de magnitude de reflexão.

4.4 QUATRO CAMADAS

Na indústria aeronáutica é comum a utilização de materiais compósitos de RCCF compostos por mais de quatro camadas, já que assim se fabricará um material mais firme e adequado para a fabricação de peças, como a fuselagem, de uma aeronave.

Figura 18 - Gráfico comparativo dos coeficientes de reflexão de material compósito de camada dupla com \mathbf{E} polarizado em y.

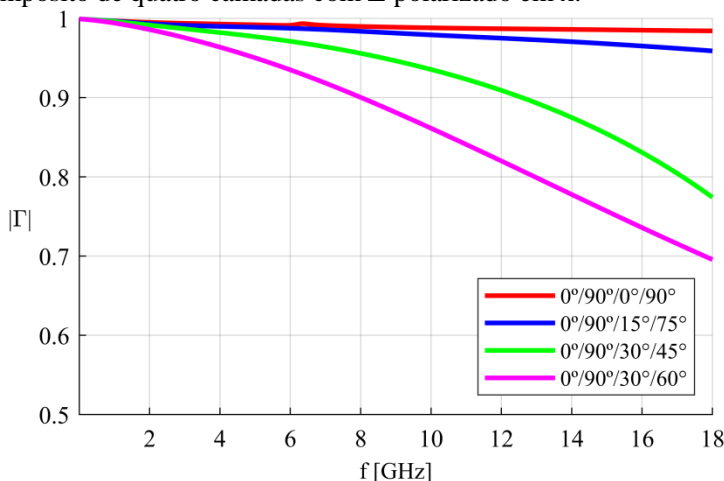


Fonte: A autora (2018).

A análise feita nesta secção tem por objetivo mostrar o comportamento da magnitude do coeficiente de reflexão, ao se adicionar mais *layers* com fibras dispostas em ângulos diferentes, mantendo-se sempre os dois *layers* de base, 0°/90°.

A Figura 20 mostra o modelo esquemático de quatro camadas, criado para ser analisado no software CST Studio Suite. Como é possível observar na Figura 19 o maior coeficiente de reflexão está no compósito 0°/90°/0°/90°, assim como nas análises de camada única e camada dupla, os melhores resultados aparecem quando se tem combinações entre fibras dispostas em 0° e 90°. Entretanto, comparando os gráficos da Figura 17 e da Figura 19 (observando que o gráfico 17 teve sua escala em y reduzida para melhor visualização), nota-se que ao adicionarmos camadas que não são 0° ou 90° tem-se uma piora na magnitude de reflexão da amostra, como no caso de 0°/90°/30°/60° comparado com o composto duplo 0°/90°. Ao analisar o VSWR da amostra 0°/90°/30°/60°, em 18 GHz, tem-se um valor em torno de 8, enquanto que para o compósito de camada dupla 0°/90° o valor do VSWR é maior que 100. Ou seja, percebe-se que acrescentar camadas quaisquer ao compósito não é sinônimo de incrementar a magnitude de reflexão, e por consequência, nem sua efetividade de blindagem.

Figura 19 - Gráfico comparativo dos coeficientes de reflexão de material compósito de quatro camadas com \mathbf{E} polarizado em x.

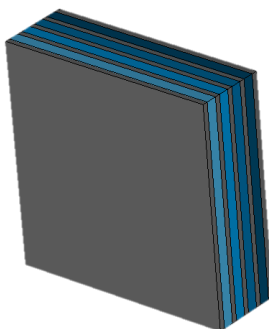


Fonte: A autora (2018).

4.5 COMPÓSITOS COM FIBRAS EM 0° e 90°

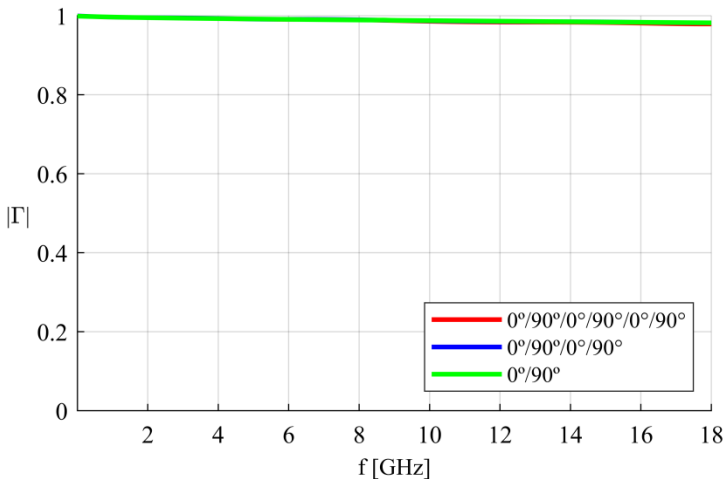
Como já mencionado, as maiores magnitudes de coeficiente de reflexão são obtidas quando o compósito está sendo montado utilizando-se de fibras dispostas em 0° e 90°. A análise a seguir visa conferir se, ao aumentar o número de *layers* 0° e 90°, haverá um acréscimo na magnitude do coeficiente de reflexão do compósito aqui definido.

Figura 20 – Modelo esquemático de material compósito de quatro camadas utilizando a aproximação homogênea de 3-layers.



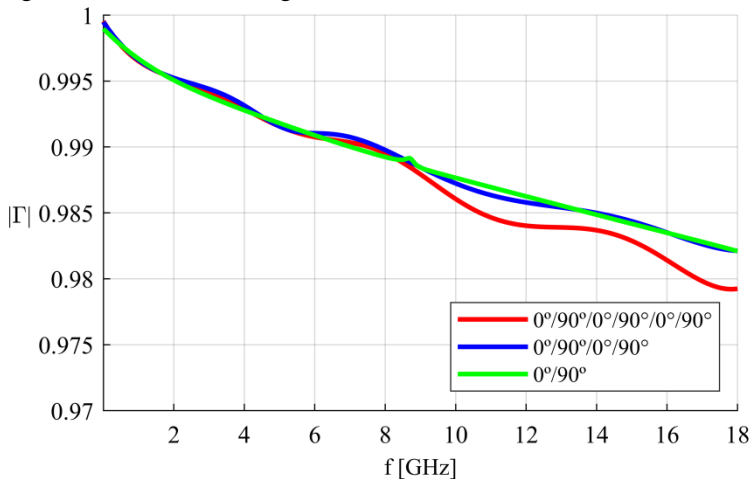
Fonte: A autora (2018).

Figura 21- Gráfico comparativo das magnitudes do coeficiente de reflexão de material compósito de duas ($0^\circ/90^\circ$), quatro ($0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ$) e de seis ($0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ$) camadas com **E** polarizado em x.



Fonte: A autora (2018).

Figura 22 - Detalhe da Figura 21

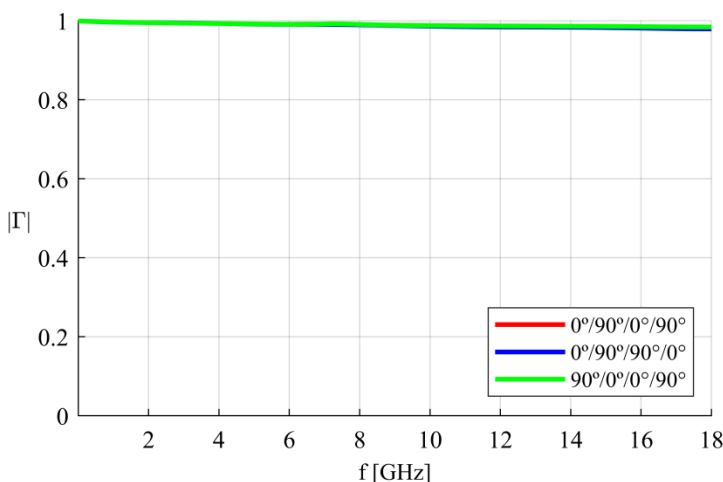


Fonte: A autora (2018).

Percebemos, pela análise das Figura 21 e Figura 22, que o coeficiente de reflexão não melhora e nem piora significativamente ao se adicionar mais camadas de 0° e 90° ao composto. Sendo assim, percebe-se, até agora, que a quantidade de camadas do composto deve ser decidida considerando outros fatores do projeto (como mecânico, químico e térmico), e não pela necessidade de blindagem eletromagnética.

A próxima análise levou em consideração se a ordem de disposição das fibras alteraria o resultado da reflexão eletromagnética do composto. Ao analisar as figuras Figura 23 e Figura 24, verifica-se que não há alteração significativa ao se mudar a ordem das camadas do composto, considerando-se sempre que a análise é feita com a amostra sendo iluminada por uma onda plana uniforme incidente ao plano normal.

Figura 23 - Gráfico comparativo das magnitudes do coeficiente de reflexão de material composto de quatro camadas com fibras dispostas em $0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ$, $0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ$ e $90^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ$, sendo **E** polarizado em x.



Fonte: A autora (2018).

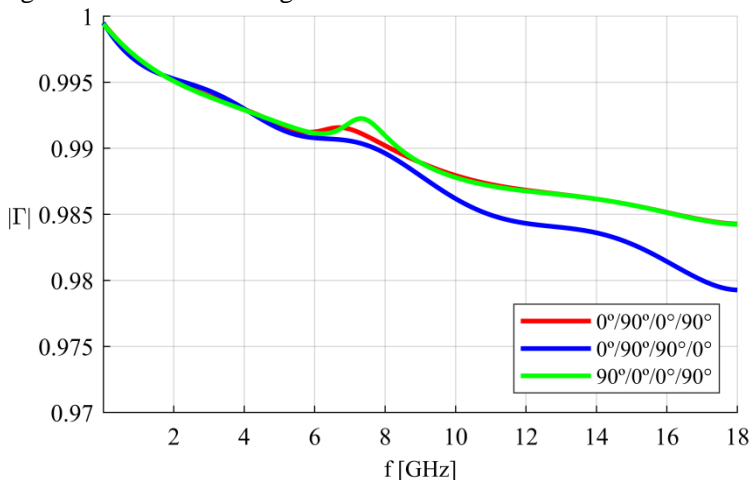
4.6 TECIDO DE RCCF

Como observado com os dados analisados anteriormente, ao se utilizar as fibras orientadas em 0° e 90° , tem-se o maior “efeito placa” possível ao trabalhar com materiais compostos RCCF. Por esta razão, é

comum a utilização de tecidos (*wovens*) de fibra de carbono (representados pela Figura 25) nas aplicações com compósitos.

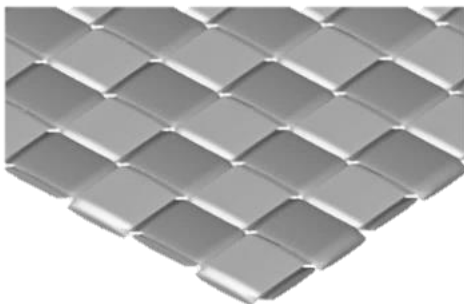
Um tecido RCCF consiste em se ter, por camada de compósito, fibras dispostas em duas direções, 0° e 90° , como mostram as Figura 26 e Figura 28:

Figura 24 - Detalhe da Figura 23



Fonte: A autora (2018).

Figura 25 - Tecido RCCF



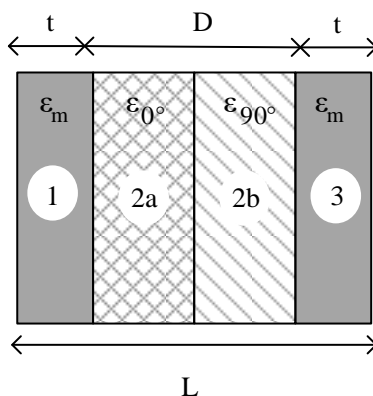
Fonte: “*Detection of Defects in Single and Multilayer Composite Material Models by Numerical Nondestructive Testing Simulations*”, Runke S. (2017).

Neste caso então, trabalhar-se-ia sempre com pares de ângulos por camada de compósito: 0° e 90° ; 30° e 120° , 45° e 135° , etc. Para a

modelagem deste tipo de RCCF, é proposto neste trabalho utilizar uma adaptação do modelo *3-layer* homogêneo de [1]. Essa adaptação consiste em trabalhar com a região 2 do modelo, dividido em duas partes: 2a e 2b, as quais sempre estarão defasadas de 90° uma da outra (Figura 26).

Para análise desta adaptação, foi comparado um compósito duplo $0^\circ/90^\circ$ com o modelo adaptado para um tecido único de RCCF, além do resultado do compósito de quatro camadas $0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ$ com uma amostra composta por dois tecidos RCCF.

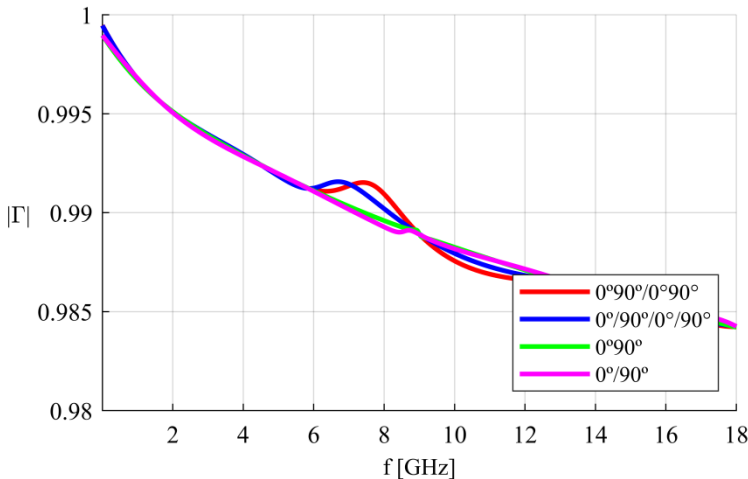
Figura 26 - Modelo adaptativo de *3-layer* homogêneo para tecido RCCF



Fonte: A autora (2018).

Como podemos observar na Figura 27, a diferença entre os gráficos é muito sutil. Dessa forma, pode-se inferir que o resultado final não seria muito diferente se fosse representado uma camada a mais de resina entre as duas direções das fibras que compõem o tecido. Por esta razão, considera-se essa adaptação válida, e mais econômica em quesitos de processamento ao se modelar material RCCF em tecido.

Figura 27 – Comparação entre um compósito $0^\circ/90^\circ$ e outro $0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ$ com um compósito de tecido único e outro de tecido duplo, respectivamente, com **E** polarizado em x.

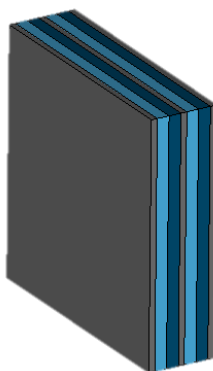


Fonte: A autora (2018).

A Figura 29 aborda o comportamento dos materiais compósitos quando são modelados como tecidos e não apenas RCCF. Tem-se então, para as mesmas dimensões de amostra utilizadas anteriormente ($L = 1\text{ mm}$, $D = 0,5\text{ mm}$, $P = 0,7\text{ mm}$, $t = 0,25\text{ mm}$, $\varepsilon_m = 2,0\varepsilon_0$, $\varepsilon_f = 4,0\varepsilon_0$ e $\bar{\sigma} = (10000, 0,1, 0,2)$) as comparações de magnitude dos coeficientes de reflexão de amostras $0^\circ/90^\circ/30^\circ/120^\circ$, $0^\circ/90^\circ/45^\circ/135^\circ$ e $0^\circ/90^\circ/60^\circ/150^\circ$.

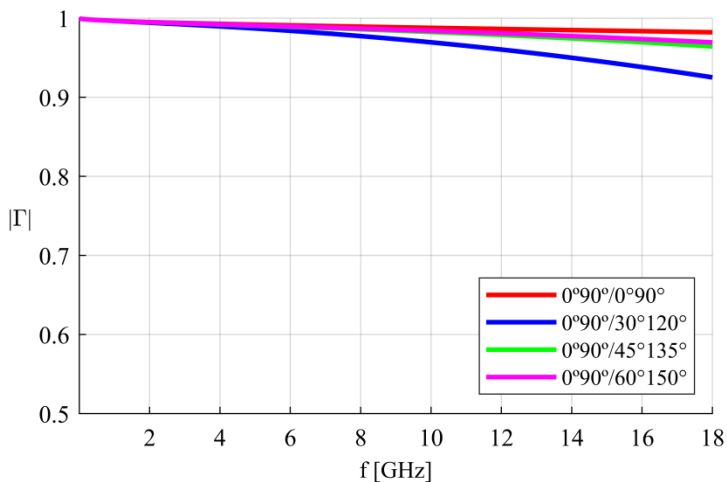
Como é possível observar, mesmo utilizando tecidos RCCF, o maior coeficiente de reflexão continua aparecendo para camadas com fibras posicionadas em 0° e 90° em relação ao eixo x. Entretanto, é importante ressaltar que ao se utilizar duas camadas de tecidos RCCF tem-se uma resposta mais satisfatória de magnitude de reflexão do que quando utilizou-se quatro *layers* de RCCF simplesmente, como constata-se ao comparar as figuras Figura 19 e Figura 30.

Figura 28 - Modelo esquemático de material compósito de duas camadas de tecido RCCF utilizando o modelo homogêneo de *3-layers* adaptado.



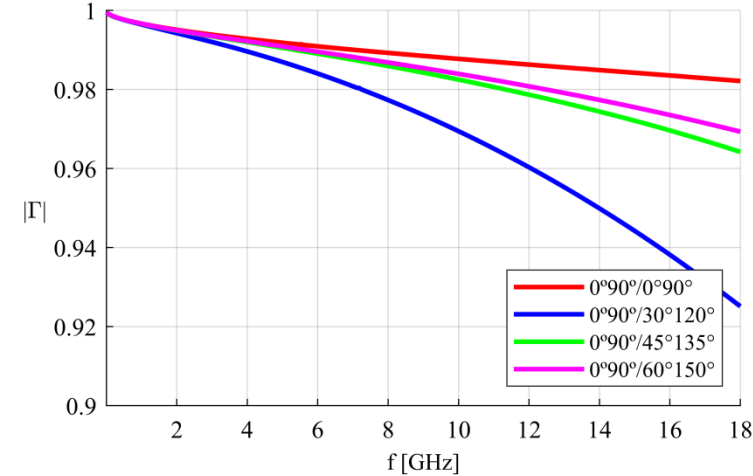
Fonte: A autora (2018).

Figura 29 - Gráfico comparativo entre compósitos de duas camadas com tecidos RCCF.



Fonte: A autora (2018).

Figura 30 - Detalhe da Figura 29



Fonte: A autora (2018).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

O trabalho aqui apresentado teve como intuito apresentar uma metodologia de modelagem eletromagnética simplificada para materiais compósitos. Em específico, materiais compósitos de fibra de carbono contínua e reforçada. O modelo simplificado utilizado foi o modelo *3-layer* homogêneo que Holloway *et al.* apresentaram em [1] e algumas adaptações. Para compósitos de camada única, foi utilizado o modelo fiel apresentado em [1]. Já para materiais compostos por n camadas, o modelo foi adaptado para uma representação de $2n+1$ *layers* por amostra. Outra adaptação foi proposta quando o tema tecidos de RCCF foi abordado, e nesta adaptação foi proposto utilizar o modelo de *3-layer* homogêneo com a região central do modelo (região 2) dividida em dois materiais com características elétricas diferentes (tensor de permissividade), que representavam a defasagem de 90° entre as fibras do tecido, por camada de composto.

Simulações computacionais foram realizadas e dos resultados dessas simulações obteve-se gráficos com as curvas da magnitude do coeficiente de reflexão de cada amostra. O trabalho tinha por objetivo encontrar um método de modelagem que permitisse a avaliação da efetividade de blindagem de cada amostra. Como foi apresentado no capítulo 2, neste texto pode-se considerar “equivalentes” os comportamentos do coeficiente de reflexão e da efetividade de blindagem do sistema, já que a impedância intrínseca da amostra será sempre menor que a impedância intrínseca do meio, ocasionando assim que o coeficiente de reflexão seja sempre menor que zero, e que conforme a magnitude deste aumenta, a efetividade de blindagem também aumenta.

Analizando os resultados, concluiu-se que compósitos confeccionados com fibras de carbono posicionadas em 0° e 90° têm um comportamento mais reflexivo do que em outras posições. Compósitos de camada única não possuem uma boa blindagem para polarizações verticais e horizontais ao mesmo tempo. Por isso, é recomendado trabalhar sempre com pelo menos duas camadas de RCCF por composto. Quanto mais próximos de 0° e 90° os ângulos estiverem (por exemplo, a combinação entre 15° e 75°), melhor será a efetividade de blindagem, entretanto eles não superarão as combinações feitas com os ângulos 0° e 90° . A ordem da disposição dos ângulos pelas camadas não traz mudanças significativas ao resultado final. De fato, aumentar a

quantidade de camadas do compósito não o torna mais reflexivo, como era o esperado, apenas incrementa sua resistência mecânica.

Foi possível visualizar que utilizar tecidos RCCF no lugar de RCCF, apenas, traz vantagens eletromagnéticas, já que se conseguem magnitudes do coeficiente de reflexão maiores (acima de 0.9), mesmo utilizando ângulos diferentes de 0° e 90° . Além disso, há também vantagens construtivas, sendo possível economizar na espessura e nas camadas de resina, já que se tem duas posições angulares por camada, e não apenas uma (como acontece quando se utiliza RCCF unidirecional).

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos posteriores, sugere-se aplicar o modelo e as adaptações aqui apresentados em casos reais, como por exemplo, na modelagem de um corpo de prova que simula a fuselagem de uma aeronave, porém em escala menor, que está aos cuidados da empresa onde a autora estagiou anteriormente.

O trabalho aqui apresentado também pode ser aplicado na modelagem de outras estruturas compostas por materiais compósitos de fibra de carbono, como antenas, e analisar se os resultados serão satisfatórios e condizentes com os resultados práticos.

Podem-se tentar utilizar, também, as adaptações abordadas nessa monografia para modelar outros tipos de materiais compósitos de fibra de carbono, além do RCCF (como CN, CB, etc.).

REFERÊNCIAS

- [1] HOLLOWAY, C.I.; SARTO, M.s.; JOHANSSON, M.. Analyzing Carbon-Fiber Composite Materials With Equivalent-Layer Models. **IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility**, [s.l.], v. 47, n. 4, p.833-844, nov. 2005. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/temc.2005.854101>.
- [2] CHU, Hsiao-chang; JENG, Shyh-kang; CHEN, Chun Hsiung. Reflection and transmission characteristics of lossy periodic composite structures. **IEEE Transactions On Antennas And Propagation**, [s.l.], v. 44, n. 4, p.580-587, abr. 1996. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/8.489311>.
- [3] NAISHADHAM, K.. Shielding effectiveness of conductive polymers. **IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility**, [s.l.], v. 34, n. 1, p.47-50, 1992. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/15.121666>.
- [4] MEHDIPOUR, Aidin. **Advanced Carbon Fiber Composite Materials for Shielding and Antenna Applications**. 2011. 167 f. Tese (Doutorado) - Curso de Electrical Engineering, Electrical And Computer Engineering, Concordia University, Montreal, 2011. Cap. 2.
- [5] ANSARIZADEH, Mohammadali. **Calculation of The Shielding Effectiveness Of Carbon-Fiber Composite Structures**. 2013. 91 f. Tese (Doutorado) - Curso de Electrical Engineering, Electrical And Computer Engineering, Concordia University, Montrel, 2013. Cap. 1.
- [6] CHUNG, Deborah Duen Ling. Review Electrical applications of carbon materials. **Journal Of Materials Science**. New York, p. 2645-2661. out. 2004.
- [7] BASTOS, João Pedro Assumpção. O Eletromagnetismo a partir das equações de Maxwell. In: BASTOS, João Pedro Assumpção. **Eletromagnetismo para Engenharia: Estática e Quase Estática**. 3. ed. Florianópolis: Editora ufsc, 2012. Cap. 2. p. 44-49.
- [8] CARPES JUNIOR, Walter Pereira. Propagação de Ondas: Revisão. In: CARPES JUNIOR, Walter Pereira. **Apostila de Engenharia de Antenas**. Florianópolis, 2015. p. 1-20.
- [9] SADIKU, Matthew N.. **Elementos de Eletromagnetismo**. 5. ed. Bookman, 2012. 716 p.

- [10] BERAN, M. J.; SILNUTZER, N. R.. Effective electrical, thermal and magnetic properties of fiber reinforced materials. **Journal Of Composite Materials**, p. 246-249. 1971.
- [11] FISHER, F.; FASSELL, W.. Lightning effects relating to aircraft. part i. lightning effects on and electromagnetic shielding properties of boron and graphite reinforced composite materials. **DTIC Document**. Tech. Rep., 1972.
- [12] KNIBBS, R.; MORRIS, J. The effects of fibre orientation on the physical properties of composites. **Composites**. p. 209-218. 1974.
- [13] CASEY, K.. Electromagnetic shielding by advanced composite materials. **Defense Technical Information Center**, 1978.
- [14] WEINSTOCK, G.. Electromagnetic integration of composite structure in aircraft. **Nato Advisory Group For Aerospace Research And Development**, Avionics Panel, Conference, 1980.
- [15] LIN, Ming-shing; CHEN, Chun Hsiung. Plane-wave shielding characteristics of anisotropic laminated composites. **IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility**, [s.l.], v. 35, n. 1, p.21-27, 1993. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/15.249392>.
- [16] LIN, M.-s. et al. Transient propagation in anisotropic laminated composites. **IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility**, [s.l.], v. 35, n. 3, p.357-365, 1993. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/15.277310>.
- [17] BUCCELLA, C.. Quasi-stationary analysis of the electric field in anisotropic laminated composites. **IEEE Transactions On Industry Applications**, [s.l.], v. 35, n. 6, p.1296-1305, 1999. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/28.806042>.
- [18] CHIN, Huan-ke; CHU, Hsiao-chang; CHEN, Chun Hsiung. Propagation modeling of periodic laminated composite structures. **IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility**, [s.l.], v. 40, n. 3, p.218-224, 1998. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/15.709419>.
- [19] NHAN, Hoang Ngoc; JEAN-LOUIS, Miane; JEAN-LUC, Wojkiewicz. Modeling of Electromagnetic Shielding Effectiveness of Multilayer Conducting Composites in the Microwave Band. **2006 First International Conference On Communications And Electronics**, [s.l.], out. 2006. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/cce.2006.350874>.

- [20] SARTO, M.s.; HOLLOWAY, C.l.. Effective boundary conditions for the time-domain analysis of the EMC performances of fiber composites. **1999 IEEE International Symposium On Electromagnetic Compatability. Symposium Record (cat. No.99ch36261)**, [s.l.], p.462-467, ago. 1999. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/isemc.1999.812948>.

APÊNDICE A

De forma a documentar todos os tensores de permissividade complexos utilizados neste trabalho, que não foram apresentados no capítulo 3, e considerando-se com $D = 0,5$ mm, $P = 0,7$ mm, $L = 1$ mm, $\varepsilon_m = 2\varepsilon_0$, $\varepsilon_f = 4\varepsilon_0$ e $[\bar{\sigma}]_{uvw} = [10000, 0, 1, 0, 2]$ S/m [4], apresentam-se abaixo:

$$[\bar{\varepsilon}]_{15^\circ} = \varepsilon_0 \begin{bmatrix} 3,0991 + \frac{9330}{j\omega\varepsilon_0} & 0,0856 + \frac{2500}{j\omega\varepsilon_0} & 0 \\ 0,0856 + \frac{2500}{j\omega\varepsilon_0} & 2,8026 + \frac{670}{j\omega\varepsilon_0} & 0 \\ 0 & 0 & 3,1220 + \frac{0,2}{j\omega\varepsilon_0} \end{bmatrix}$$

$$[\bar{\varepsilon}]_{45^\circ} = \varepsilon_0 \begin{bmatrix} 2,9509 + \frac{5000}{j\omega\varepsilon_0} & 0,1711 + \frac{5000}{j\omega\varepsilon_0} & 0 \\ 0,1711 + \frac{5000}{j\omega\varepsilon_0} & 2,9509 + \frac{5000}{j\omega\varepsilon_0} & 0 \\ 0 & 0 & 3,1220 + \frac{0,2}{j\omega\varepsilon_0} \end{bmatrix}$$

$$[\bar{\varepsilon}]_{60^\circ} = \varepsilon_0 \begin{bmatrix} 2,8653 + \frac{2500}{j\omega\varepsilon_0} & 0,1482 + \frac{4330}{j\omega\varepsilon_0} & 0 \\ 0,1482 + \frac{4330}{j\omega\varepsilon_0} & 3,0364 + \frac{7500}{j\omega\varepsilon_0} & 0 \\ 0 & 0 & 3,1220 + \frac{0,2}{j\omega\varepsilon_0} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{\varepsilon} \end{bmatrix}_{75^\circ} = \varepsilon_0 \begin{bmatrix} 2,8026 + \frac{670}{j\omega\varepsilon_0} & 0,0856 + \frac{2500}{j\omega\varepsilon_0} & 0 \\ 0,0856 + \frac{2500}{j\omega\varepsilon_0} & 3,0991 + \frac{9330}{j\omega\varepsilon_0} & 0 \\ 0 & 0 & 3,1220 + \frac{0,2}{j\omega\varepsilon_0} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{\varepsilon} \end{bmatrix}_{90^\circ} = \varepsilon_0 \begin{bmatrix} 2,7797 + \frac{0,1}{j\omega\varepsilon_0} & 0 & 0 \\ 0 & 3,1220 + \frac{10000}{j\omega\varepsilon_0} & 0 \\ 0 & 0 & 3,1220 + \frac{0,2}{j\omega\varepsilon_0} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{\varepsilon} \end{bmatrix}_{120^\circ} = \varepsilon_0 \begin{bmatrix} 2,8653 + \frac{2500}{j\omega\varepsilon_0} & -0,1482 - \frac{4330}{j\omega\varepsilon_0} & 0 \\ -0,1482 - \frac{4330}{j\omega\varepsilon_0} & 3,0364 + \frac{7500}{j\omega\varepsilon_0} & 0 \\ 0 & 0 & 3,1220 + \frac{0,2}{j\omega\varepsilon_0} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{\varepsilon} \end{bmatrix}_{135^\circ} = \varepsilon_0 \begin{bmatrix} 2,9509 + \frac{5000}{j\omega\varepsilon_0} & -0,1711 - \frac{5000}{j\omega\varepsilon_0} & 0 \\ -0,1711 - \frac{5000}{j\omega\varepsilon_0} & 2,9509 + \frac{5000}{j\omega\varepsilon_0} & 0 \\ 0 & 0 & 3,1220 + \frac{0,2}{j\omega\varepsilon_0} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} - \\ \varepsilon \end{bmatrix}_{150^\circ} = \varepsilon_0 \begin{bmatrix} 3,0364 + \frac{7500}{j\omega\varepsilon_0} & -0,1482 - \frac{4330}{j\omega\varepsilon_0} & 0 \\ -0,1482 - \frac{4330}{j\omega\varepsilon_0} & 2,8653 + \frac{2500}{j\omega\varepsilon_0} & 0 \\ 0 & 0 & 3,1220 + \frac{0,2}{j\omega\varepsilon_0} \end{bmatrix}$$